



Fábio Alexandre Lameira da Costa Luís

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Influência da humidade no comportamento mecânico de compósitos de madeira-plástico

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de construção

Orientador: José M. S. R. Saporiti Machado, Investigador Auxiliar,
LNEC

Co-orientador: Fernando F. S. Pinho, Professor Auxiliar, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Carlos Manuel Chastre Rodrigues

Arguente: Prof. Doutora Maria Paulina Faria Rodrigues

Vogal: Doutor José M. S. R. Saporiti Machado



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2014



Fábio Alexandre Lameira da Costa Luís

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Influência da humidade no comportamento mecânico de compósitos de madeira-plástico

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de construção

Orientador: José M. S. R. Saporiti Machado, Investigador Auxiliar,
LNEC

Co-orientador: Fernando F. S. Pinho, Professor Auxiliar, FCT-UNL



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2014

“Copyright” Fábio Alexandre Lameira da Costa Luís, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Quero manifestar o meu apreço por todas as pessoas que direta ou indiretamente me ajudaram na elaboração deste trabalho, no meu percurso académico e na minha vida.

Ao Doutor José Saporiti Machado, orientador da presente dissertação, pela disponibilidade, conhecimento, orientação e confiança transmitidas durante o período de elaboração da mesma.

Ao Professor Doutor Fernando F. S. Pinho, co-orientador da presente dissertação, pela disponibilidade, orientação e incentivo demonstrados durante a elaboração da mesma.

Ao Engenheiro António Silva, pela sua ajuda e ensinamentos ao longo de todo o desenvolvimento experimental, em particular, pela disponibilidade e apoio.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil por ter criado as condições para o desenvolvimento deste trabalho.

Um agradecimento especial a todos os meus amigos, dentro e fora da faculdade que de uma maneira ou de outra me apoiaram e ajudaram a que tudo tenha sido menos difícil.

E, porque os últimos são sempre os primeiros, um agradecimento muito especial aos meus pais Fernando Luís e Alzira Luís e à minha namorada Vânia Margarida, pelo apoio e compreensão nos momentos mais difíceis, que sempre estiveram do meu lado e me ampararam.

RESUMO

As crescentes questões ambientais têm vindo a impor, entre outras, a necessidade da reciclagem dos desperdícios produzidos por diversos setores (agricultura, indústria e serviços). Nesta ótica têm vindo a surgir um conjunto alargado de produtos compósitos que incluem os compósitos de madeira-plástico (Wood Plastic Composites).

Estes compósitos têm vindo a competir com os produtos de madeira em diversos nichos de mercado, sendo o maior deles os revestimentos de piso em ambiente exterior, vulgarmente designados de deckings. Estes compósitos são comercializados salientando as suas vantagens relativamente à madeira maciça, como seja maior durabilidade biológica e menor variabilidade de propriedades mecânicas e físicas.

No final do ano 2013 e início de 2014, foram reportadas uma série de anomalias na aplicação de réguas de compósitos madeira-plástico, nomeadamente a diminuição do desempenho físico e mecânico destes materiais, quando sujeitos a períodos prolongados de humedificação. Embora, para a maioria dos casos reportados, estas anomalias se devam a condições deficientes de aplicação, a possibilidade de alteração de características à flexão, quando sujeitos a condições de uma aplicação exterior, ainda não se encontra bem estudada.

Na presente dissertação são avaliados e apresentados os efeitos no comportamento à flexão de três tipos diferentes de réguas de compósito madeira-plástico, quando sujeitos a condições de humidade permanente ou cíclica. Para este efeito, foram conduzidos um conjunto de ensaios, nomeadamente, de flexão para determinação da pré-carga, de resistência à humidade e de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido à imersão em água e a ambiente húmido. Posteriormente, os resultados obtidos foram sujeitos a uma verificação aos Estados Limite de Serviço.

Os resultados revelaram reduzidas variações dimensionais (inchamento) e perdas significativas de módulo de elasticidade, apenas devido à exposição a elevados níveis de humidade, mostrando-se o caso de exposição prolongada a água líquida o mais gravoso.

Relativamente aos Estados Limite de Serviço, sobretudo a longo prazo, os resultados mostraram-se bastante gravosos, nomeadamente para o material de menor qualidade.

Palavras chave: Compósitos madeira-plástico; comportamento à flexão, módulo de elasticidade, humedecimento

ABSTRACT

Growing environmental concerns have been imposing, among others, the need for recycling waste made by several sectors (agriculture, industry and services). From this point of view it has been arise a wide range of composite products, which include wood-plastic composites (WPC).

These composites have been competing with wood products in a different market niches, the largest are the floorings in outdoor environment, commonly known as decking. WPC are sold emphasizing their advantages over solid wood, such as increased biological durability, and less variation of mechanical and physical properties.

At the end of 2013 and early 2014, were reported a several number of anomalies in the application in rules of wood-plastic composites, including the decrease of physical and mechanical performance of these materials when subject to prolonged periods of moistening. Although, for most of the reported cases, these anomalies are the result of poor conditions of application, the possibility of changing the bending characteristics, when subjected to conditions of an external application, is not well studied.

In the present work are evaluated and reported the effects on flexural behavior of three different types of wood-plastic composite, when exposed to conditions of permanent or cyclical moisture. For this purpose, was conducted a series of tests, in particular for the determination of flexural preload, moisture resistance and dimensional variation and modulus of elasticity due to immersion in water and humid environment. Subsequently, the results obtained were subjected to a verification of the Serviceability Limit States.

The results reveal reduced dimensional changes (swelling), and significant loss of modulus of elasticity, only from the exposure to high humidity levels, being the prolonged exposure to liquid water the most severe.

For the Serviceability Limit States, particularly in long term, the results were quite severe, particularly for lower quality material.

Keywords: Wood-plastic composites; flexural behavior, modulus of elasticity, moistening

LISTA DE SIGLAS E PARÂMETROS

Siglas

ATR	Attenuated total reflection
COV	Coefficient of variation
b	Largura do provete
EC 5	Eurocódigo 5
ELS	Estados limite de serviço
E_m	Módulo de elasticidade em flexão
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy
G_t	Inchamento
IICT	Instituto de Investigação Científica Tropical
k_{def}	Fator de deformação
L	Distância entre apoios do provete ou vão do provete
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
P	Carga aplicada ao provete
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de alta densidade
PP	Polipropileno
PVC	Policloreto de vinilo
t	Espessura do provete
UNL	Universidade Nova de Lisboa
UV	Ultravioleta
w_{fin}	Deformação final
w_{inst}	Deformação instantânea
WPC	Wood plastic composites
ΔM	Declive da reta carga deformação entre 10% e 40% da carga última
Δ_m	Variação de massa
Ψ_2	Coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável

ÍNDICE

1 - INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais.....	1
1.2 Objetivos do trabalho.....	1
1.3 Metodologia e organização do trabalho.....	2

2 - ENQUADRAMENTO DO TEMA

2.1 Considerações iniciais.....	3
2.2 Compósitos de madeira plástico.....	3
2.3 Aplicação na construção de compósitos de plásticos reforçados a fibras de madeira.....	5
2.4 Anomalias frequentes observadas em obra.....	6
2.4.1 Inchamento e empeno por absorção de água.. ..	6
2.4.2 Degradação microbiana.....	7
2.4.3 Oxidação e desintegração	8
2.4.4 Foto-degradação	9
2.5 Trabalhos de investigação no âmbito do presente estudo.....	10
2.6 Normas Europeias aplicáveis.....	16
2.6.1 NP EN 321 (2010)	16
2.6.2 NP EN 317 (2002)	16
2.6.3 NP EN 310 (2002)	17
2.6.4 EN 1995-1 (2004) – Eurocódigo 5 (EC5)	17

3 - PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais.....	21
3.2 Compósito madeira plástico.....	21
3.3 Ensaio de caracterização	22
3.3.1 Ensaio de flexão para determinação da pré-carga	23
3.3.2 Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido à imersão em água.....	24
3.3.3 Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido a ambiente húmido	29

3.3.4 Ensaio de resistência à humidade	33
4 - ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	
4.1 Considerações iniciais.....	41
4.2 Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido à imersão em água.....	41
4.3 Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido a ambiente húmido.....	45
4.4 Ensaio de resistência à humidade	47
4.5 Análise global e comparação com outros trabalhos de investigação	50
4.5.1 Perda de módulo de elasticidade dos materiais expostos ao ensaio de resistência à humidade.....	50
4.5.2 Absorção de água dos materiais expostos à imersão em água	51
4.5.3 Perda de módulo de elasticidade dos materiais expostos à imersão em água	52
5 - VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITE DE SERVIÇO	
5.1 Condições iniciais.....	53
5.2 Condições assumidas na verificação	53
5.3 Resultados	54
6- CONCLUSÕES	
6.1 Conclusões	57
6.2 Desenvolvimentos futuros.....	58
Referências Bibliográficas	59
 Anexo 1 - RESULTADOS DA ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO MÉDIO (ATR-FTIR)	 63
Anexo 2 - RESULTADOS INDIVIDUAIS DO ENSAIO DE IMERSÃO EM ÁGUA.....	67
Anexo 3 - RESULTADOS INDIVIDUAIS DO ENSAIO EM AMBIENTE HÚMIDO	75
Anexo 4 - RESULTADOS INDIVIDUAIS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À HUMIDADE	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Perfis de compósitos de madeira-plástico (WPC).....	3
Figura 2.2 – Exemplo de diferentes perfis de régua de WPC	4
Figura 2.3 – Aplicações de WPC.....	5
Figura 2.4 – Deformação de um WPC sujeito a humidade.	6
Figura 2.5 – Bolores em pavimentos.	7
Figura 2.6 – Bolores em régua de WPC da presente dissertação.	8
Figura 2.7 – Desintegração de régua de WPC em pavimento	8
Figura 2.8 – Descoloração de pavimentos devido aos UV.....	9
Figura 2.9 – Imagem de provete através de microscópio de varrimento eletrónico	11
Figura 2.10 – Detalhes das componentes do WPC em estudo	12
Figura 2.11 – Ensaio de absorção de água.....	12
Figura 2.12 – Absorção de água em função do tempo	13
Figura 2.13 – Módulo de elasticidade e absorção de água em função do tempo.	13
Figura 2.14 – Efeito da absorção de água no módulo de elasticidade	15
 Figura 3.1 – Perfis dos Materiais A, B e C.....	 22
Figura 3.2 – Determinação de dimensões.....	23
Figura 3.3 – Ensaio de carga aos provetes.	23
Figura 3.4 – Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido à imersão em água.....	24
Figura 3.5 – Valores médios do inchamento do material A imerso em água.	25
Figura 3.6 – Valores médios do inchamento do material B imerso em água.	25
Figura 3.7 – Valores médios do inchamento do material C imerso em água.....	26
Figura 3.8 – Valores médios dos módulos de elasticidade e da massa dos dez provetes do material A no ensaio de imersão.....	27
Figura 3.9 – Valores médios dos módulos de elasticidade e da massa dos dez provetes do material B imersos em água	28
Figura 3.10 – Valores médios dos módulos de elasticidade e da massa dos dez provetes do material C imersos em água	28
Figura 3.11 – Câmara de saís.....	29
Figura 3.12 – Valores médios do inchamento do material A em ambiente húmido.	30

Figura 3.13 – Valores médios do inchamento do material B em ambiente húmido.	30
Figura 3.14 – Valores médios do inchamento do material C em ambiente húmido.	30
Figura 3.15 – Valores médios dos módulos de elasticidade e da massa dos dez provetes do material A em ambiente húmido.	32
Figura 3.16 – Valores médios dos módulos de elasticidade e da massa dos dez provetes do material B em ambiente húmido.	32
Figura 3.17 – Valores médios dos módulos de elasticidade e da massa dos dez provetes do material C em ambiente húmido.	32
Figura 3.18 – Ensaio de resistência à humidade	34
Figura 3.19 – Valores médios do inchamento do material A no ensaio de resistência à humidade.	34
Figura 3.20 – Valores médios do inchamento do material B no ensaio de resistência à humidade.	35
Figura 3.21 – Valores médios do inchamento do material C no ensaio de resistência à humidade.	35
Figura 3.22 - Valores médios da massa dos materiais A, B e C no ensaio de resistência à humidade.	36
Figura 3.23 - Valores dos módulos de elasticidade dos dez provetes do material A no ensaio de resistência à humidade.	37
Figura 3.24 - Valores dos módulos de elasticidade dos dez provetes do material B no ensaio de resistência à humidade.	37
Figura 3.25 - Valores dos módulos de elasticidade dos dez provetes do material C no ensaio de resistência à humidade.	37
Figura 3.26 - Valores médios dos módulos de elasticidade no ensaio de resistência à humidade.	38
Figura 4.1 - Valores médios do inchamento em espessura dos materiais A, B e C no ensaio de imersão.	41
Figura 4.2 - Valores médios do inchamento em largura dos materiais A, B e C imersos em água	42
Figura 4.3 - Valores médios do inchamento em comprimento dos materiais A, B e C imersos em água	42
Figura 4.4 – Valores médios da variação de massa em relação à medição inicial dos materiais A, B e C imersos em água.	43
Figura 4.5 – Valores médios da variação de módulos de elasticidade em relação à medição inicial dos materiais A, B e C imersos em água.	43
Figura 4.6 – Correlação entre a variação de massa e o módulo de elasticidade dos materiais A, B e C.	44
Figura 4.7 - Valores médios do inchamento em espessura dos materiais A, B e C em ambiente húmido.	45
Figura 4.8 - Valores médios do inchamento em largura dos materiais A, B e C em ambiente húmido.	45

Figura 4.9 - Valores médios do inchamento em comprimento dos materiais A, B e C em ambiente húmido.....	46
Figura 4.10 – Valores médios da variação de massa em relação à medição inicial dos materiais A, B e C em ambiente húmido.....	46
Figura 4.11 – Valores médios da variação de módulos de elasticidade em relação à medição inicial dos materiais A, B e C em ambiente húmido.....	47
Figura 4.12 - Valores médios do inchamento em espessura dos materiais A, B e C no ensaio de resistência à humidade.....	48
Figura 4.13 - Valores médios do inchamento em largura dos materiais A, B e C no ensaio de resistência à humidade.....	48
Figura 4.14 - Valores médios do inchamento em comprimento dos materiais A, B e C no ensaio de resistência á humidade.....	48
Figura 4.15 – Valores médios da variação de massa em relação à medição inicial dos materiais A, B e C no ensaio de resistência à humidade.....	49
Figura 4.16 - Variação dos valores médios dos módulos de elasticidade de cada material em relação à fase inicial no ensaio de resistência à humidade.....	50
Figura 4.17 – Percentagem de perda de rigidez dos materiais sujeitos ao ensaio de resistência à humidade.....	51
Figura 4.18 – Percentagem de variação de massa dos materiais sujeitos à imersão em água.....	51
Figura 4.19 – Percentagem de perda de rigidez dos materiais sujeitos à imersão em água.....	52
Figura 5.1 – Limite das perdas de módulo de elasticidade para o material A.....	54
Figura 5.2 – Limite das perdas de módulo de elasticidade para o material B.....	55
Figura 5.3 – Limite das perdas de módulo de elasticidade para o material C.....	55

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. – Variações das propriedades físicas e mecânicas de compósitos de PEAD antes e após a exposição aos ciclos gelo/degelo	11
Tabela 2.2 – Dimensões da seção transversal dos componentes.....	12
Tabela 2.3 – Efeito da absorção de água e exposição às temperaturas de 45 °C e 21 °C nas propriedades mecânicas do banzo e da alma.	14
Tabela 2.4 – Efeito da absorção de água nas propriedades mecânicas do banzo e da alma à temperatura de 21 °C ao longo do tempo.	14
Tabela 2.5 – Efeito dos ciclos gelo/degelo nas propriedades mecânicas do banzo e da alma.....	15
Tabela 3.1- Perfis madeira plástico; detalhes da seção transversal dos perfis e textura	21
Tabela 3.2- Valores que definem a força de pré-carga.....	24
Tabela 3.3 - Valores médios e desvio padrão da massa dos materiais A, B e C imersos em água.	26
Tabela 3.4 - Valores médios e desvio padrão dos módulos de elasticidade dos materiais A, B e C no imersos em água.	27
Tabela 3.5 - Valores médios e desvio padrão da massa dos materiais A, B e C em ambiente húmido.	31
Tabela 3.6 - Valores médios e desvio padrão dos módulos de elasticidade dos materiais A, B e C em ambiente húmido.	31
Tabela 3.7 - Valores médios e desvio padrão da massa dos materiais A, B e C no ensaio de resistência à humidade.	36
Tabela 3.8 - Valores médios e desvio padrão dos módulos de elasticidade dos materiais A, B e C no ensaio de resistência à humidade.	38
Tabela 5.1 - Valores de sobrecarga e Ψ_2	53
Tabela 5.2 - Percentagens máximas de perda de módulo de elasticidade a partir do qual não se cumpre os ELS estabelecido face à utilização e ao vão	54

1.1 Considerações iniciais

Com o crescente aumento da preocupação sobre questões ambientais cada vez mais produtos que resultam ou podem resultar da incorporação de sub-produtos ou resíduos têm vindo a ser desenvolvidos.

No campo dos produtos de madeira, os compósitos de termoplásticos reforçados com madeira, vulgarmente designados como compósitos de madeira-plástico (Wood Plastic Composites), têm vindo a ser crescentemente utilizados, nomeadamente substituindo a madeira maciça em aplicações em ambiente exterior [6].

Têm sido reportadas algumas anomalias nas régua de compósitos madeira-plástico aplicadas em revestimentos de piso em ambiente exterior, nomeadamente a diminuição do desempenho físico e mecânico destes materiais, quando sujeitos a períodos prolongados de humedificação assim como casos de deformação excessiva deste material após a sua aplicação [10].

Esta dissertação com o tema “*Influência da humidade no comportamento mecânico de compósitos de madeira-plástico*”, realizada no âmbito do mestrado integrado em Engenharia Civil na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT-UNL), surge do interesse de perceber qual a influência do efeito da humidade em régua de deck madeira-plástico, com a consequente análise da alteração do módulo de elasticidade do material quando sujeito a diferentes níveis de absorção de água.

1.2 Objetivos do trabalho

Esta dissertação tem como objetivo avaliar o efeito da humidade no comportamento mecânico de régua de compósito madeira-plástico.

O estudo consistiu na condução de ensaios de humedecimento em régua de deck madeira-plástico de perfil alveolar, nomeadamente, através da imersão em água, da sua colocação em condições de humidade relativa do ar elevadas e através de ciclos de imersão/gelo/secagem, com a consequente análise da alteração do seu módulo de elasticidade atendendo a diversos níveis de absorção de água. Foram abrangidos três “gamas” de materiais: Um de muito boa qualidade, um intermédio e um de fraca qualidade.

Com a presente dissertação pretende-se contribuir para um melhor conhecimento do comportamento deste tipo de materiais, quando sujeitos a diversas condições de humedificação.

1.3 Metodologia e organização do trabalho

A presente dissertação está dividida numa componente teórica, correspondente ao **Capítulo 2**, e numa componente experimental, **Capítulos 3 a 5**. A componente experimental desta dissertação engloba ensaios físicos, nomeadamente, massa volúmica, humedecimento, envelhecimento acelerado e ensaios mecânicos de flexão, tendo sido estes ensaios realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Esta avaliação compreende três tipos diferentes de régua que serão denominadas de material A, B e C para possibilitar a sua distinção.

No **Capítulo 1**, surgem as considerações iniciais, os objetivos e a metodologia e organização do trabalho.

No **Capítulo 2** é apresentado um enquadramento ao tema, partindo do geral para influência da humidade no comportamento mecânico de compósitos de madeira plástico, da sua utilização na construção civil. São reportadas algumas das principais anomalias observadas em obra e efetuada uma referência a artigos de revista e congresso relevantes para o caso em estudo.

No **Capítulo 3** identificam-se os materiais utilizados. São descritos os protocolos utilizados nos ensaios desenvolvidos e apresentados os resultados obtidos.

No **Capítulo 4** são discutidos os resultados obtidos. Procede-se à comparação dos resultados dos ensaios com artigos referenciados no capítulo segundo.

No **Capítulo 5** é efetuada uma verificação aos Estados Limite de Serviço, sendo apresentadas as condições assumidas na verificação e respetivos resultados.

No **Capítulo 6** apresentam-se as principais conclusões e referem-se alguns desenvolvimentos futuros.

No **Anexo** são apresentados os resultados obtidos na campanha experimental.

ENQUADRAMENTO DO TEMA

2.1 Considerações iniciais

Neste capítulo é feito um enquadramento da presente dissertação, começando-se por efetuar uma apresentação dos materiais utilizados na campanha experimental, segue-se as possibilidades da aplicação destes materiais na construção e, por fim, descrevem-se algumas anomalias relatadas em pavimentos aplicados com este tipo de materiais.

O enquadramento teórico é completado com a apresentação de dois trabalhos de investigação no âmbito do presente estudo.

2.2 Compósitos de madeira plástico

Os materiais compósitos de madeira-plástico (WPC), Figura 2.1, tornaram-se cada vez mais aceites pelos consumidores como alternativa aos materiais de madeira maciça devido a algumas vantagens, nomeadamente, a sua durabilidade, variedade de cores, resistência à degradação provocada por fungos e reduzida manutenção. Apresentam assim algumas vantagens, tais como elevada densidade, elevada resistência mecânica, apresentam uma boa aparência, são 100% recicláveis, de fácil instalação e possuem uma vida útil cerca de dez vezes superior aos produtos de madeira correntemente utilizados [20].



Figura 2.1 – Perfis de compósitos de madeira-plástico (WPC) [25].

Os compósitos de termoplásticos reforçados com madeira são, de uma forma geral, obtidos dispersando partículas de madeira num termoplástico levado ao estado líquido por fusão, utilizando diversas técnicas de fabrico [23]. As partículas de madeira são normalmente finas, podendo ser farinha de madeira, serradura ou resíduos de plantas agrícolas, tipicamente

cortado, moído ou outros tipos de fibras naturais, tais como cânhamo, juta, geralmente como um subproduto do respetivo processo industrial [10].

O fabrico dos WPC consiste num processo constituído por dois passos: no processo de composição, em que é feita a mistura com farinha de madeira e plásticos derretidos, produzindo assim as partículas de plástico de madeira e, por fim, no processo de moldagem, no qual são aquecidas e comprimidas as partículas de madeira e de plástico, formando as formas desejadas.

Os processos de moldagem típicos são a injeção, compressão, extrusão, sendo a extrusão o processo mais comum para o fabrico de WPC. O desempenho físico e mecânico dos WPC são afetados por vários parâmetros, nomeadamente, a seleção de espécies de madeira, a temperatura e pressão da composição, da moldagem e a fórmula das composições de material. Com a crescente utilização dos WPC para fins de construção, surge a importância de compreender os efeitos da alteração da composição do material ao nível do comportamento mecânico, como por exemplo, a adição de agentes de acoplamento em WPC para melhorar a ligação entre a farinha de madeira e a matriz. Também é essencial observar que o tamanho das partículas de madeira e fonte de resinas recicladas afetam o desempenho dos WPC [12].

Segundo Andrea Wechsler e Salim Hiziroglu [23], existe a necessidade de melhorar as suas propriedades físicas e mecânicas, bem como a aparência destes produtos. Existem diversas formas de melhorar as propriedades globais dos WPC, nomeadamente usando uma proporção certa de matéria-prima, mistura e preparação ótimas dos elementos do produto e a adição de pequenas quantidades de aditivos, tais como agentes de acoplamento, corantes, agentes antimicrobianos e estabilizadores de luz durante a sua produção.

Existem no mercado dois tipos de perfis: perfil maciço e perfil alveolar, Figura 2.2.

Na presente dissertação foram utilizados perfis alveolares.

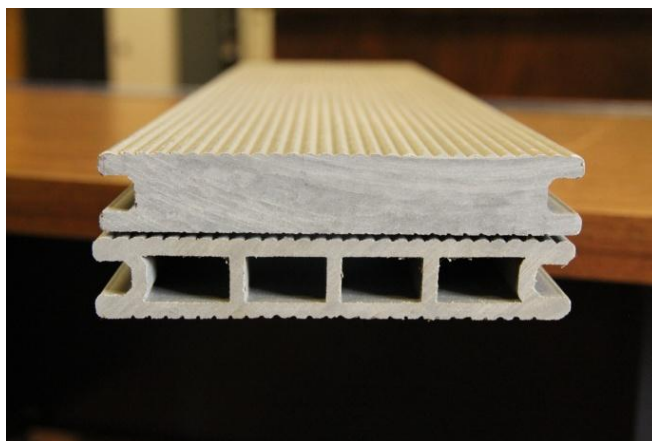


Figura 2.2 – Exemplo de diferentes perfis de réguas de WPC.

Estes materiais quando imersos em água durante vinte e quatro horas, apresentam tipicamente uma absorção de água entre 0,7% e 3% da sua massa, em comparação com produtos constituídos por madeira maciça, que podem absorver água acima dos 24% da sua massa. A

longo prazo estes valores podem chegar aos 30% para o caso dos compósitos de madeira plástica e acima dos 100% para o caso de produtos de madeira maciça [10].

2.3 Aplicação na construção de compósitos de plásticos reforçados a fibras de madeira

Os compósitos de madeira-plástico têm sido desenvolvidos desde 1916, tendo como primeira aplicação na indústria automóvel. Um dos primeiros compósitos comerciais de WPC foi lançado no mercado em 1975 pela companhia sueca SONESSON PLAST AB (Malmo, Suécia) sob a marca registada “SONWOOD” [8].

Atualmente, devido ao crescente interesse nos princípios de sustentabilidade, estes produtos têm vindo aumentar a sua quota de utilização na construção (cerca de 70% da produção).

As aplicações mais relevantes dos WPC no sector da construção são diversas, Figura 2.3, nomeadamente, perfis de portas e janelas, portas, escadas, pavimentos, aplicação em jardins e exteriores, telhas e elementos para telhados, condutas, revestimentos, régua para várias aplicações, forros e remates, docas, cercas [6].

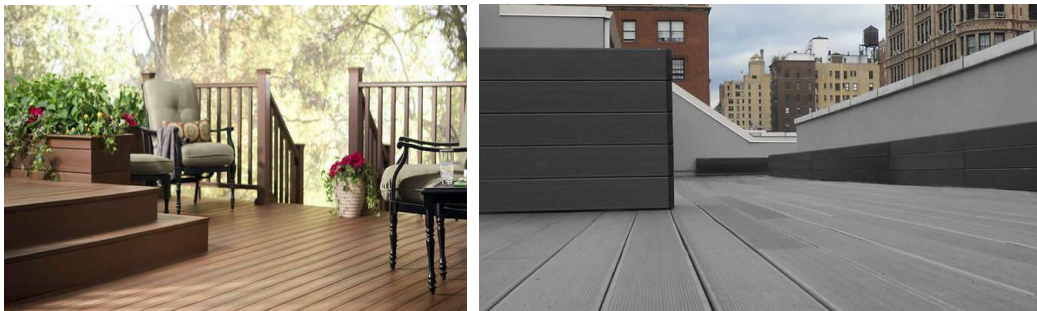


Figura 2.3 – Aplicações de WPC [26, 27].

Nos últimos anos tem existido um crescimento significativo da aplicação destes materiais no sector da construção. Ao nível do mercado norte-americano, as aplicações de WPC em portas e janelas passaram de 0,7 milhões de euros em 1992, para 45,5 milhões de euros em 2001 [24]. As aplicações em jardins e exteriores têm vindo a ser um dos principais impulsionadores de desenvolvimento recente dos compósitos madeira-plástico. No mercado dos EUA para dois grandes produtos de WPC (componentes de decks e gradeamento) totalizaram cerca de 1,3 bilião de dólares em 2006 (projeção), correspondendo a aproximadamente 22% do total de decks e gradeamentos (madeira, madeira plástica, vinil, WPC) [10].

Apesar de apresentarem um custo de aquisição mais elevado, cerca de duas a três vezes superior ao custo das régua de madeira maciça [10], os decks em WPC têm conquistado mercado, com os fabricantes de WPC a apresentarem o argumento de que os WPC são produtos ecológicos, pois muitos deles são fabricados com madeiras e plásticos reciclados, sendo os próprios WPC materiais recicláveis e tendo à partida um custo de ciclo de vida inferior aos dos produtos em madeira, ao possuir um baixo custo de manutenção [4].

2.4 Anomalias frequentes observadas em obra

Nesta seção é efetuado um levantamento das principais anomalias reportadas em fontes bibliográficas, nomeadamente ao nível de:

- Inchamento e empeno por absorção de água
- Degradação microbiana
- Oxidação e desintegração
- Foto-degradação

2.4.1 Inchamento e empeno por absorção de água

Os materiais de WPC apresentam níveis de absorção de água variáveis consoante os fabricantes, a sua composição e o seu processo de fabrico. Segundo Omid Hosseinaei *et. al.* [7], os WPC fabricados com farinha de madeira extraída com água quente possuíam uma maior resistência à humidade e uma menor perda de propriedades mecânicas.

A absorção de água por estes materiais pode conduzir a uma série de acontecimentos tais como distorções, inchamento e empeno dos perfis e à propagação de humidade a outros elementos construtivos. Além disso, a saturação de água das régua de WPC conduzem a uma perda do módulo de elasticidade, resultando assim a uma maior deflexão das régua sob carga. A saturação de água deste material também conduz a uma detioração mais rápida das régua, oxidação (uma vez que a água é um catalisador de oxidação do plástico) e outras consequências negativas.

Existem alguns problemas de deformação e destaques quando a folga entre estes elementos é insuficiente, uma vez que ao absorverem água as régua aumentam de dimensões, desenvolvendo-se elevadas tensões de compressão entre os elementos. Assim, normalmente, os destaques de peças resulta de uma instalação inadequada dos pavimentos de WPC.

Na Figura 2.4 é visível um exemplo de um caso de destaque de um WPC devido a esta anomalia.



Figura 2.4 – Deformação de um WPC sujeito a humidade [10].

Normalmente para este fenómeno ocorrer é necessário existir um contacto com água durante um período de longo tempo (dias ou semanas). Contudo, quanto menor for a densidade de uma régua de WPC mais provável é essa régua deformar e destacar após um período mais curto de contacto com água [10].

Assim, de forma a minimizar a absorção de água deste tipo de materiais, estes devem possuir a maior densidade possível que a sua formulação permita [10].

2.4.2 Degradação microbiana

Relativamente a esta anomalia, têm vindo a ser reportados casos em que os produtos se apresentavam cobertos de machas escuras de bolor, visíveis na Figura 2.5, que não desapareciam com a limpeza [10].

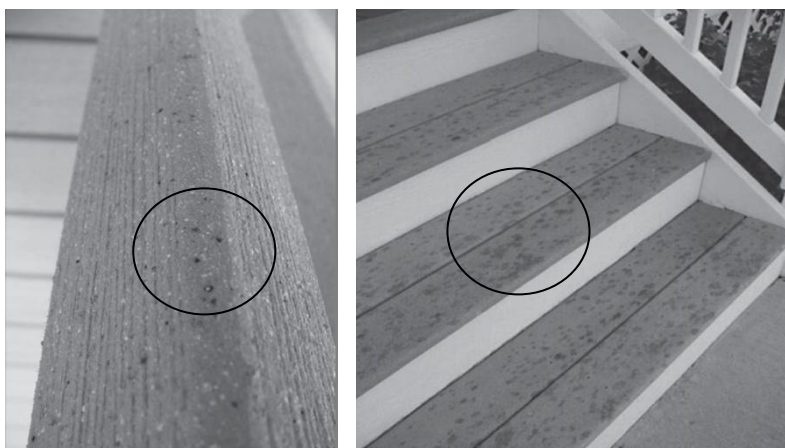


Figura 2.5 – Bolores em pavimentos [10].

Segundo Nele Defoirdt *et. al.* [2], para níveis de teor de água das partículas dos compósitos entre 21% e 43% (níveis atingidos no seu método), assiste-se ao desenvolvimento do crescimento de fungos.

Esta anomalia pode dever-se à formulação dos decks, nomeadamente os produtos com uma porosidade relativa elevada e com uma menor densidade. Na maioria dos casos, estes fenómenos reportam-se a perfis extrudidos de WPC com a ausência ou quantidades insuficientes de antioxidantes na sua formulação. Tipicamente este tipo de WPC têm tendência a absorver maiores quantidades de água que outros WPC do mercado. As formulações que contêm não apenas antioxidantes mas também minerais criam uma barreira natural à degradação microbiana destes materiais. A incorporação de biocidas e de agentes antimicrobianos são também soluções para retardar ou prevenir os bolores [10].

Outra das causas destas anomalias pode dever-se à instalação incorreta dos materiais. A instalação imprópria das régua, associada normalmente com a falta de ventilação na parte inferior dos decks, com a sua colocação junto ao solo, particularmente quando este se apresenta húmido.

A água nestes decks pode ser mantida durante longos períodos de tempo criando assim condições favoráveis a proliferação de bolores, como visível na Figura 2.6, retirada durante o ensaio de imersão em água da presente dissertação. Naturalmente em pavimentos mal aplicados, as áreas humidificadas pela chuva, secam muito mais lentamente que em pavimentos secos, podendo levar ao aparecimento destes bolores [10].

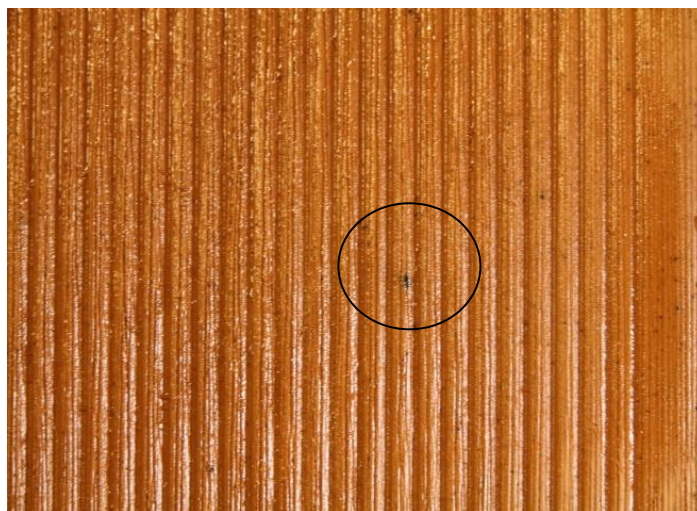


Figura 2.6 – Bolores em régua de WPC da presente dissertação.

2.4.3 Oxidação e desintegração

Uma das características mais desagradáveis, prejudiciais e inesperadas dos WPC passou a ser a sua elevada vulnerabilidade à oxidação, levando estes materiais à sua desintegração. Durante o processo de desintegração as régua de deck apresentam fissuras, a sua superfície torna-se mais suave e poeirenta (Figura 2.7). Eventualmente as régua de WPC podem entrar em colapso apenas derivado ao seu peso próprio [10].

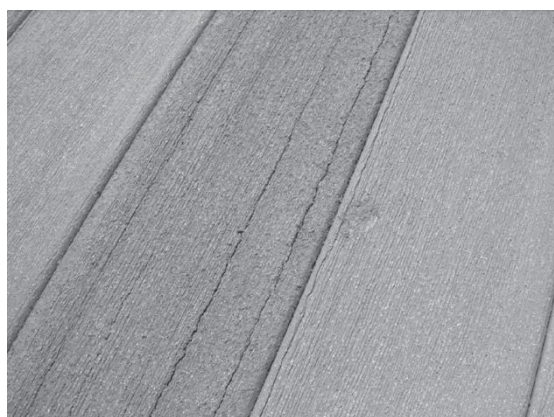


Figura 2.7 – Desintegração de régua de WPC em pavimento [10].

Existem diversos fatores que proporcionam uma rápida oxidação dos WPC, nomeadamente a inexistência ou uma insuficiente adição de antioxidantes na sua formulação.

A adição de antioxidantes visa tanto a preservação do plástico durante o processo de altas temperaturas como a sua proteção em serviço, em plataformas sujeitas aos efeitos nocivos da radiação solar, da água, dos poluentes e de outros elementos.

Resumidamente, os antioxidantes eliminam os radicais livres que se formam no processo de degradação do plástico pelo oxigénio e iniciada pela temperatura e pela radiação ultravioleta, assistida pela humidade, tensão, presença de metais e outros catalisadores de oxidação do plástico. Se os radicais livres não forem intercetados pelos antioxidantes, o polímero de plástico sofre uma degradação que pode conduzir à perda de integridade do plástico [10].

2.4.4 Foto-degradação

A perda de cor deste tipo de materiais quando sujeitos à incidência direta da radiação solar é uma característica destes produtos que tem sido geralmente aceite pelos utilizadores, uma vez que as pessoas se acostumam a esta descoloração com os decks de madeira comum. No entanto os utilizadores não são informados ou desconhecem o fato de alguns WPC praticamente não perderem a sua cor acabando assim por aceitar e conformar-se com esta perda. A incidência solar nestes produtos ao longo do dia não é preocupante, no entanto em diversos casos, após meses de exposição a diferença de cor é claramente perceptível, como pode ser observada na Figura 2.8 [10].

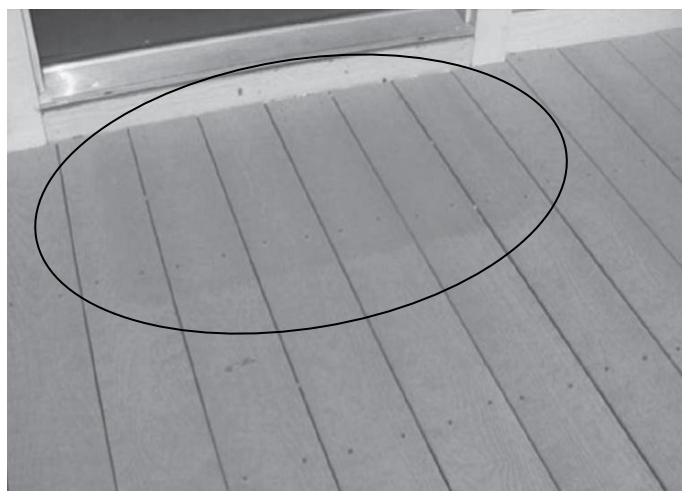


Figura 2.8 – Descoloração de pavimentos devido aos UV [10].

Segundo Makomoto kigushi *et. al.* [9], a descoloração de um WPC exposto é causada pela degradação da madeira e do plástico. A lenhina da madeira absorve fortemente radiação ultravioleta (UV) levando à despolimerização acelerada tanto da lenhina como da celulose da madeira. As componentes foto-degradadas são lavadas pela chuva e as superfícies de madeira tornam-se de cor mais clara.

A perda de coloração destes materiais depende de diversos fatores nomeadamente da composição dos WPC, tais como o teor de fibras de madeiras, o tipo de fibras celulósicas, a quantidade de estabilizadores UV, antioxidantes e o tipo de corantes utilizados [9,10]. A presença de cromóforos no plástico e na madeira geralmente contribui para o aumento da

absorção dos UV por parte destes materiais, provocando assim posteriormente a sua foto-degradação [5].

As condições de exposição ao ambiente exterior também são um fator importante na sua descoloração, nomeadamente se o revestimento de piso se encontra protegido ou totalmente exposto aos agentes atmosféricos (nomeadamente à chuva e à radiação solar) [6, 23].

De referir que esta anomalia normalmente não afeta os pavimentos a nível estrutural, sendo apenas um problema ao nível estético.

2.5 Trabalhos de investigação no âmbito do presente estudo

Na presente secção são revistos dois trabalhos de investigação publicados em artigos internacionais (Pilarski, J. M., & Matuana, L. M.: *Durability of wood flour-plastic composites exposed to accelerated freeze-thaw cycling. II. High density polyethylene matrix* [17]; Tamrakar, S., & Lopez-Anido, R. A.: *Water absorption of wood polypropylene composite sheet piles and its influence on mechanical properties* [21]), com relevância para o tema e indicados os principais resultados obtidos pelos mesmos, de modo a facilitar o enquadramento da presente dissertação.

- Pilarski, J. M., & Matuana, L. M.: *Durability of wood flour-plastic composites exposed to accelerated freeze-thaw cycling. II. High density polyethylene matrix* [17].

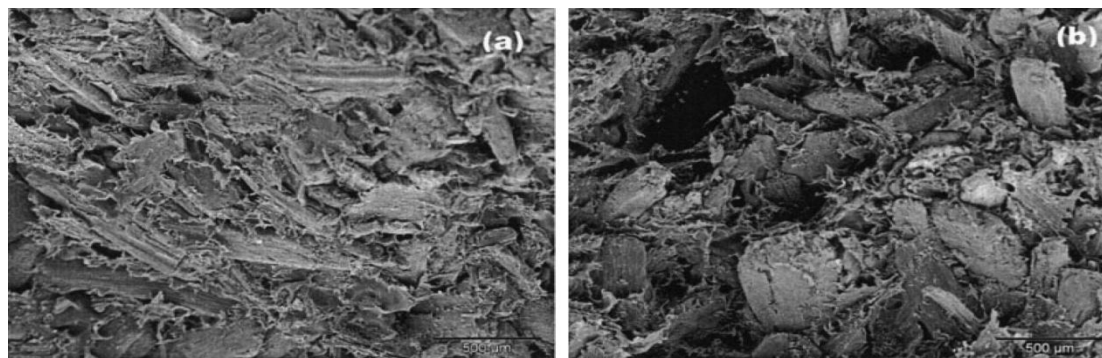
Este estudo teve como objetivo examinar a durabilidade de compósitos de farinha de madeira e polietileno de alta densidade (PEAD), expostos a quinze ciclos acelerados de imersão em água, congelamento e secagem.

Relativamente à fase de imersão em água, os provetes foram imersos em água à temperatura de aproximadamente 21 °C, medidos a cada 24h até o seu ganho de peso ser inferior a 1%, sendo considerado que a amostra tinha atingido o seu equilíbrio de humidade. A fase de congelamento procedeu-se com a colocação dos provetes durante 24h numa câmara de congelamento controlada à temperatura de -27 ± 2 °C. A fase de secagem procedeu-se com a colocação dos provetes durante 24h numa sala com ambiente controlado à temperatura de 23 ± 2 °C e humidade relativa de $50\pm 4\%$.

Foram avaliados dois tipos de farinha de madeira (plátano e pinho) avaliando a sua massa volúmica, através da utilização de 5 provetes para cada formulação, e as suas propriedades mecânicas, nomeadamente a tensão de rutura (MOR) e o módulo de elasticidade (MOE), utilizando 15 provetes de WPC.

Na Figura 2.9 a) e b) são apresentadas duas imagens de um provete de WPC com composição de farinha de plástico, obtidas através de um microscópio de varrimento eletrónico, antes e após a exposição de um provete aos 15 ciclos de gelo/degelo.

Na Tabela 2.1 são apresentados os resultados médios das variações físicas e mecânicas dos compósitos de madeira-plástico antes e após os ciclos gelo/degelo.



a) Provete antes da exposição a gelo/degelo; b) Provete após a exposição a gelo/degelo.

Figura 2.9 – Imagem de provete de WPC através de microscópio de varrimento eletrônico [17].

Tabela 2.1. – Variações das propriedades físicas e mecânicas de compósitos de PEAD antes e após a exposição aos ciclos gelo/degelo [17]

Propriedades de flexão e físicas	Compósitos com plátano		Compósitos com pinho	
	Inicial	Após 15 ciclos	Inicial	Após 15 ciclos
MOR (MPa)	20,73±2,26	16,31±1,40	24,68±1,04	23,47±0,51
MOE (GPa)	1,63±0,33	0,83±0,11	2,21±1,04	1,38±0,07
Massa volúmica (g/cm ³)	0,89±0,03	0,90±0,02	0,99±0,003	1,01±0,02

Os resultados deste estudo indicaram que o ciclo acelerado gelo/degelo teve um impacto significativo na durabilidade dos compósitos de PEAD de 50% para qualquer um dos tipos de madeira utilizada no estudo. Os compósitos com farinha de plátano foram os que apresentaram maiores perdas, cerca de 49% no MOE e 21% na MOR. Estas propriedades perdidas podem causar problemas se este material for aplicado em construção. Por outro lado os compósitos com farinha de pinho obtiveram perdas de 37% no MOE e de apenas 5% na MOR.

As ações dos ciclos não tiveram efeitos aparentes ao nível da massa volúmica dos compósitos para ambos os tipos de madeiras. No entanto a massa volúmica mais baixa observada nas amostras de plátano em comparação com as amostras de pinho, resultaram num aumento da absorção de água e consequente perda de propriedades para os compósitos com farinha de plátano.

Devido à posterior comparação destes resultados com os da presente dissertação, convém salientar as principais diferenças entre ambos. Estas encontram-se nos métodos, nomeadamente na quantidade de ciclos realizados, no tempo de imersão em água, na duração e temperatura das fases de secagem. Relativamente à quantidade de ciclos realizados, nomeadamente nos ciclos gelo/degelo, no trabalho realizado por Pilarski, J. M., & Matuana, L. M. [17] foram realizados 15 ciclos em vez de 3, o tempo de imersão em água foi até atingir estabilização, enquanto que, no presente trabalho foi de 70h, a duração e temperatura das fases de secagem foi de 24h a 23 °C no estudo de Pilarski, J. M., & Matuana, L. M. [17] em vez de 70h a 70 °C.

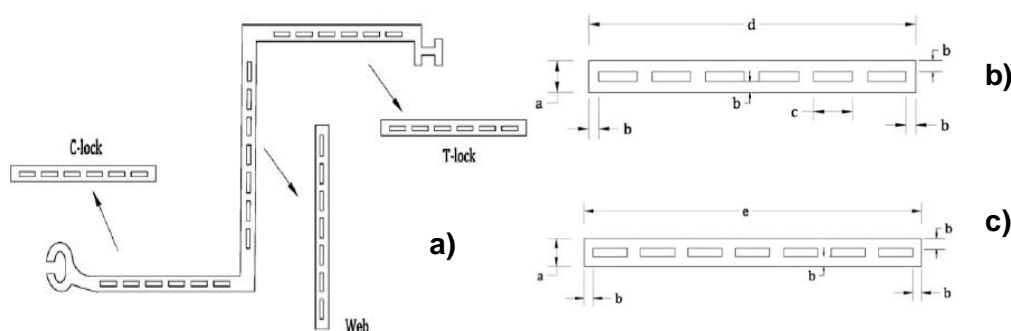
- Tamrakar, S., & Lopez-Anido, R. A.: *Water absorption of wood polypropylene composite sheet piles and its influence on mechanical properties* [21].

Este trabalho de investigação teve como objetivo estudar a absorção de água de compósitos de madeira e polipropileno (PP) e a influência nas suas propriedades mecânicas. Foram realizados ensaios de absorção de água em amostras retiradas de material usado em seções em Z (Figura 2.10), por imersão em água da torneira a 21 °C (Figura 2.11 a)), 45 °C e 70 °C (Figura 2.11 b) e c)). A resistência ao ciclo gelo/degelo dos compósitos saturados foi estudada através de ciclos de variação de temperaturas entre os 21 °C e os -29 °C.

Na Tabela 2.2 e na Figura 2.10 a), b) e c) são apresentadas respetivamente as dimensões dos respetivos perfis e as respetivas seções transversais detalhadas dos componentes da alma (web) e do banzo (flange) do WPC em estudo.

Tabela 2.2 – Dimensões da seção transversal dos componentes [21].

Notação	Dimensão (mm)
A	15,5
B	5,1
C	19,6
D	165,0
E	185,4



a) Componentes da seção em Z do WPC; b) Perfil da componente do banzo;
c) Perfil da componente da alma.

Figura 2.10 – Detalhes das componentes do WPC em estudo [21].



a) Ensaio de absorção de água a 21 °C; b) Ensaio de absorção de água a 70 °C após 2 dias de imersão;
c) Ensaio de absorção de água a 70 °C após 175 dias de imersão.

Figura 2.11 – Ensaios de absorção de água [21].

Relativamente aos ensaios de absorção de água, estes foram realizados num total de 7 conjuntos de provetes. Cada conjunto de provetes incluía 5 amostras provenientes das “C- e T-lock” do banzo e 5 amostras das seções da alma. Os ensaios de absorção de água foram realizados a 21 °C utilizando 5 conjuntos de provetes e realizados a 45 e 70 °C para 1 conjunto de provetes. Previamente os provetes foram condicionados a 50 ± 3 °C durante 24h, retirados, arrefecidos e determinadas as medições iniciais.

Relativamente ao ciclo gelo/degelo, este foi realizado num conjunto de provetes, após 209 dias de imersão em água à temperatura ambiente. Foram efetuados 4 ciclos higrotérmicos, compreendendo cada ciclo a colocação numa câmara de congelamento a -29 ± 2 °C durante um período de 24h e a retoma à temperatura de 21 °C durante 24h. Após completos os ciclos os provetes foram condicionados à temperatura ambiente (21 °C), ainda imersos em água durante 5 dias, procedendo-se a ensaios de flexão.

Na Figura 2.12 apresenta-se os resultados da absorção de água em função da duração em dias.

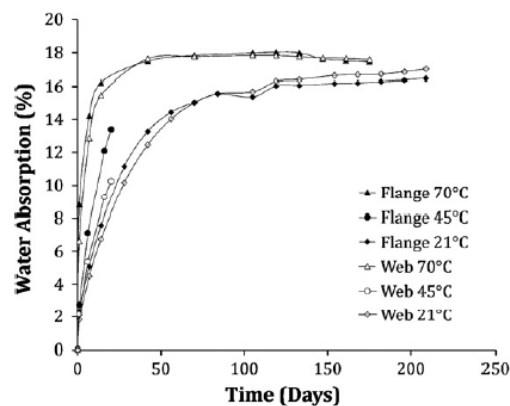
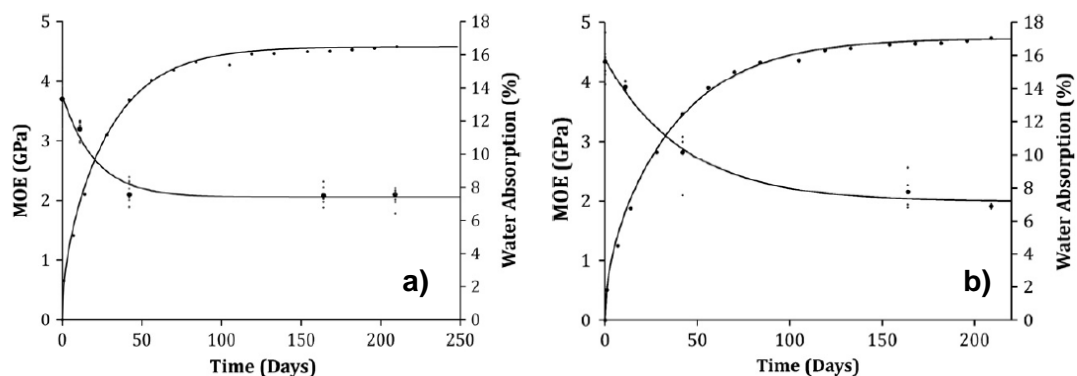


Figura 2.12 – Absorção de água em função do tempo [21].

Na figura 2.13 a) e b) apresenta-se respetivamente os resultados dos módulos de elasticidade e absorção de água e função do tempo por parte do banzo e da alma.



a) Resultados do banzo; b) Resultados da alma;

Figura 2.13 – Módulo de elasticidade e absorção de água em função do tempo [21].

Na Tabela 2.3 são apresentados respetivamente os resultados do efeito da absorção de água e da exposição às temperaturas de 45 °C e 21 °C nas propriedades mecânicas do banzo e da alma.

Tabela 2.3 – Efeito da absorção de água e exposição às temperaturas de 45 °C e 21 °C nas propriedades mecânicas do banzo e da alma [21].

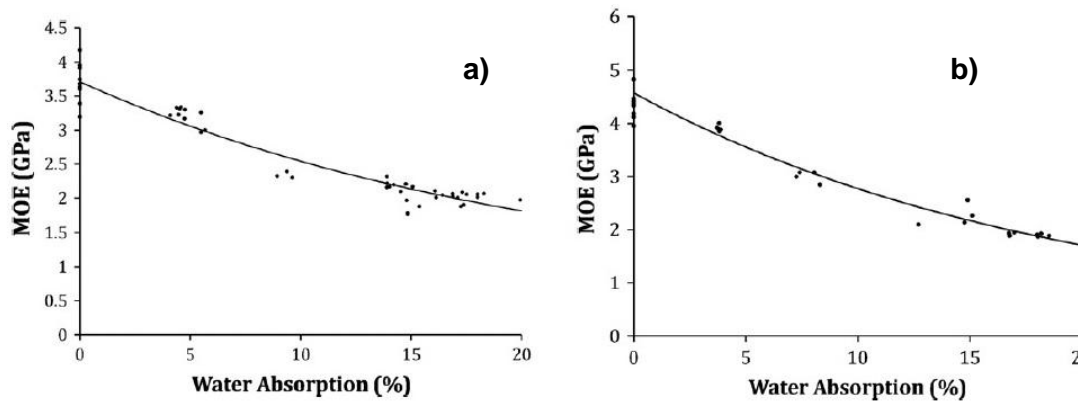
Elemento	Absorção de água	Tempo (dias)	MOE (GPa)	COV (%)	MOR (MPa)	COV (%)
Banzo	0% (control)	0	3.7	8	22.5	7
	13.3% a 45 °C	20	2.1	6	22.1	18
	13.9% a 21 °C	42	2.1	9	21.9	17
Alma	0% (control)	0	4.3	6	32.1	6
	10.2% a 45 °C	20	2.3	6	29	4
	8.7% a 21 °C	42	2.8	15	27.9	9

Na Tabela 2.4 são apresentados os resultados do efeito da absorção de água nas propriedades mecânicas do banzo e da alma à temperatura de 21 °C ao longo do tempo.

Tabela 2.4 – Efeito da absorção de água nas propriedades mecânicas do banzo e da alma à temperatura de 21 °C ao longo do tempo [21].

Elemento	Absorção de água	Tempo (dias)	MOE (GPa)	COV (%)	MOR (MPa)	COV (%)
Banzo	0% (control)	0	3.7	8	22.5	7
	4.80%	11	3.2	4	26.9	10
	13.90%	42	2.1	9	21.9	17
	16.50%	164	2.1	6	21.8	9
	15.20%	209	2.1	7	22.6	8
Alma	0% (control)	0	4.3	6	32.1	6
	3.80%	11	3.9	2	31.9	4
	8.70%	42	2.8	15	27.9	9
	16.00%	164	2.2	13	25	9
	17.60%	209	1.9	2	22.3	4

Na Figura 2.14 a) e b) apresenta-se respetivamente a influência da absorção de água nos módulos de elasticidade do banzo e da alma.



a) Resultados do banzo; b) Resultados a alma;

Figura 2.14 – Efeito da absorção de água no módulo de elasticidade [21].

Na Tabela 2.5 são apresentados os resultados do efeito dos ciclos gelo/degelo nas propriedades mecânicas do banzo e da alma.

Tabela 2.5 – Efeito dos ciclos gelo/degelo nas propriedades mecânicas do banzo e da alma [21].

Elemento	Absorção de água	MOE (GPa)	COV (%)	MOR (MPa)	COV (%)
Banzo	0% (control)	3.7	8	22.5	7
	15.2% a 21 °C	2.1	7	22.6	8
	Re-secagem (21 °C)	2.5	7	24.3	5
	Re-secagem (70 °C)	1.8	14	20.7	9
	Gelo/degelo	2	7	21.4	8
Alma	0% (control)	4.3	6	32.1	6
	17.6% a 21 °C	1.9	2	22.3	4
	Re-secagem (21 °C)	2.5	4	25.3	2
	Re-secagem (70 °C)	1.9	16	21.9	11
	Gelo/degelo	2.4	22	26.4	12

Os resultados deste estudo indicaram que a absorção de água na saturação dos materiais WPC considerados neste estudo foi de respetivamente 16,5% e 17,0% para o banzo e para a alma. Estes valores excedem o limite de 5% estabelecido nas especificações para estruturas à beira-mar definidos pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos [11].

A absorção de água teve um efeito adverso sobre o módulo de elasticidade (MOE), que diminuiu em cerca 43% para as amostras saturadas com água a 21 ° C quando em comparação com as amostras de controlo iniciais. Estas reduções de rigidez excedem o limite

de 10% estabelecido nas especificações do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos [11].

Verificou-se ainda que a degradação do módulo de elasticidade é uma forte função do aumento da percentagem de absorção de água.

Os resultados experimentais mostraram que as alterações no módulo de elasticidade foram independentes do tempo e temperatura de exposição, indicando que a degradação em módulo de elasticidade poderia ser assumida como sendo inteiramente devida à percentagem de absorção de água por si só.

Devido à posterior comparação destes resultados com os da presente dissertação, convém salientar as diferenças entre os métodos de ensaio com imersão em água, nomeadamente o tempo total de imersão e no ensaio de gelo/degelo, a quantidade de ciclos realizados, a duração e temperatura das fases de secagem e o facto de o ensaio de Tamrakar, S., & Lopez-Anido, R. A. [21] se ter iniciado com material que tinha sido previamente imerso em água (209 dias de imersão). Relativamente ao tempo total de imersão em água, os autores [21] fizeram-no em 5016h em vez de 3692h do presente trabalho. Nos ciclos gelo/degelo a quantidade de ciclos realizados foram 4 ciclos em vez de 3, e a duração e temperatura das fases de secagem foi 24h a 21 °C no estudo dos mesmos autores em vez de 70h a 70 °C.

2.6 Normas Europeias aplicáveis

Relativamente aos ensaios preconizados de exposição à humidade por parte destes materiais, são utilizadas em Portugal algumas normas, nomeadamente a NP EN 321 (2010) [15], a NP EN 317 (2002) [14], a NP EN 310 (2002) [13] e o EC5-Parte 1-1 (2004) [3].

2.6.1 NP EN 321 (2010) [15]

Para a determinação da resistência à humidade de placas de derivados de madeira através da execução de ensaios cíclicos é utilizada a NP EN 321 (2010) [15]. Esta norma compreende a execução de métodos de ensaios, realizando três ciclos de imersão em água, gelo e secagem em estufa, de forma a simular a aplicação de perfis em condições de extremas conduzindo a um envelhecimento acelerado do material. Após o tratamento cíclico, os provetes são recondicionados e determina-se o seu inchamento através da NP EN 317 (2002) [14] e a resistência à flexão segundo a NP EN 310 (2002) [13].

Em março do presente ano foi publicada através da norma EN 15534-1:2014(E) [1] uma alteração a este procedimento, nomeadamente a inclusão de um período de imersão inicial dos provetes de 28 dias no primeiro ciclo, a redução de três ciclos para dois ciclos e um aumento de duas horas na fase de secagem.

2.6.2 NP EN 317 (2002) [14]

Para a determinação do inchamento das peças é utilizada a NP EN 317 (2002) [14]. Na campanha experimental realizada o procedimento de determinação das dimensões foi adaptado à norma europeia NP EN 325 (2013) [16]. O cálculo do inchamento é efetuado

através da comparação das dimensões iniciais antes e após determinado período de imersão em água a 20 °C, recorrendo à seguinte expressão 2.1:

$$G_t = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100 \quad (2.1)$$

Em que:

G_t [%] – Inchamento

t_1 [mm] – Espessura do provete antes da imersão

t_2 [mm] – Espessura do provete após imersão

2.6.3 NP EN 310 (2002) [13]

Para a determinação do módulo de elasticidade em flexão e da resistência à flexão é utilizada a NP EN 310 (2002) [13]. O cálculo do módulo de elasticidade é determinado utilizando o respetivo declive da parte retilínea da curva carga-deformação, através da aplicação de uma força no meio de um provete suportado por dois apoios.

O módulo de elasticidade calculado representa o módulo aparente e não o módulo real, pois o método de ensaio engloba o corte e a flexão.

O valor do módulo de elasticidade pode ser determinado pela expressão 2.2:

$$E_m = \frac{L^3}{4 \times b \times t^3} \times \Delta M \quad (2.2)$$

Em que:

E_m [N/mm²] – Módulo de elasticidade em flexão

L [mm] – Distância entre o centro dos apoios

b [mm] – Largura do provete

t [mm] – Espessura do provete

ΔM [mm/N] - declive da reta carga deformação entre 10% e 40% da carga última

2.6.4 EN 1995-1 (2004) – Eurocódigo 5 (EC5) [3]

O EC 5 (2004) - Parte 1-1 [3] estabelece os princípios gerais para o projeto de estruturas de madeira, assim como as regras específicas para edifícios, dividindo-se em onze seções.

No Capítulo 5 da presente dissertação foi efetuado o recurso à secção sete (Estados Limite de Serviço) para verificar o impacto dos resultados obtidos no desempenho dos “deks” em utilização.

No Estado Limite de Serviço (ELS) é incluída a deformação dos elementos tais como a flecha a meio vão de vigas, caso das régua de WPC que representam uma viga. O comportamento da madeira maciça e dos seus derivados ao longo do tempo é um aspeto importante na avaliação do estado limite de deformação, uma vez no início que a estrutura responde instantaneamente com uma deformação, w_{inst} , perante a aplicação de uma carga, vindo esta a aumentar sob o

efeito de uma ação ao longo do tempo (fluência). Numa fase inicial a velocidade de deformação é elevada (fluência primária). Posteriormente, a velocidade atenua e mantém-se aproximadamente constante no tempo (fluência secundária). A aplicação do conceito de ELS às estruturas de madeira obriga assim à introdução da noção do fator de deformação, k_{def} . Este fator tem em conta a deformação por fluência e a classe de serviço relevante para os vários tipos de madeira estrutural, destinando-se a resolver os problemas relacionados com a duração das ações e classes de serviço a que o elemento está sujeito. Com a aplicação deste coeficiente é obtida a deformação final da estrutura, por incremento da deformação instantânea. A deformação deve ser calculada para a combinação característica de ações e usando os valores médios dos módulos de elasticidade.

No caso em estudo, foi considerando uma viga bi-encastada pois os apoios permitem alguma resistência a momentos fletores. O valor da deformação instantânea obtém-se através da seguinte expressão, retirada das Tabelas Técnicas [19]:

$$w_{inst} = \frac{1}{384} \times \frac{PL^4}{EI} \quad (2.3)$$

Em que:

w_{inst} [mm] – Deformação instantânea

P [kN/mm²] – Carga aplicada ao provete

L [mm] – Vão do provete

E [kPa] – Módulo de elasticidade médio final do provete

I [mm⁴] – Inércia do provete

A deformação final, w_{fin} , é calculada para a combinação de ações quase-permanente, usando as expressões 2.4 a 2.6:

$$w_{fin} = w_{fin,G} + w_{fin,Q} \quad (2.4)$$

$$w_{fin,G} = w_{inst,G} (1 + k_{def}) \quad (2.5)$$

$$w_{fin,Q} = w_{inst,Q} (1 + \Psi_2 k_{def}) \quad (2.6)$$

Em que:

w_{fin} [mm] – Deformação final

$w_{fin,G}$ [mm] – Deformação final devido a uma ação permanente G

$w_{fin,Q}$ [mm] – Deformação final devido a uma ação variável Q

$w_{inst,G}$ [mm] – Deformação instantânea devido a uma ação permanente G

$w_{inst,Q}$ [mm] – Deformação instantânea devido a uma ação variável Q

k_{def} – Fator de deformação

Ψ_2 – Coeficiente para a determinação do valor quase-permanente de uma ação variável.

No EC5 [3] são estabelecidos assim os seguintes limites para a deformação de uma estrutura, representados na expressão 2.3 e 2.4:

$$w_{inst} \leq \frac{L}{300} \quad (2.7)$$

$$w_{fin} \leq \frac{L}{250} \quad (2.8)$$

Em que:

w_{inst} [mm] – Módulo de elasticidade em flexão

w_{fin} [mm] – Distância entre o centro dos apoios

L [mm] – Vão do provete

PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Considerações iniciais

Neste capítulo descreve-se a campanha experimental realizada (procedimentos experimentais e resultados obtidos) que permitiu efetuar uma caracterização física (inchamento e massa volumica) e uma caracterização mecânica (determinação do módulo de elasticidade) das régua de compósito madeira-plástico.

Todos os procedimentos experimentais foram executados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

3.2 Compósito madeira plástico

Os ensaios incidiram sobre três tipos diferentes de régua de compósito madeira-plástico (WPC), dois deles com marcação CE (material B e C) e um terceiro (material A) representando material de “marca branca”, comercializado a preço bastante inferior aos restantes, constituindo assim referência a um produto de menor qualidade e com menor suporte técnico disponibilizado pelo fornecedor. Desta forma foram abrangidos três “gamas” de materiais: Um de muito boa qualidade, um intermédio e um de fraca qualidade.

Os ensaios de caracterização do material foram realizados num total de 90 amostras retiradas das respetivas régua (material A, B e C).

Os detalhes dos referidos perfis das régua de WPC, com suas características, estão apresentados na Tabela 3.1. Na Figura 3.1 são apresentados os respetivos perfis.

Tabela 3.1 - Perfis madeira plástico; detalhes da secção transversal dos perfis e textura

Material	Composição da matriz plástica	Espessura (mm)	Largura (mm)	Comprimento (mm)	Figura do perfil
A	PE	25	150	500	a)
B	PEAD	25	140	500	b)
C	PVC	24	140	500	c)

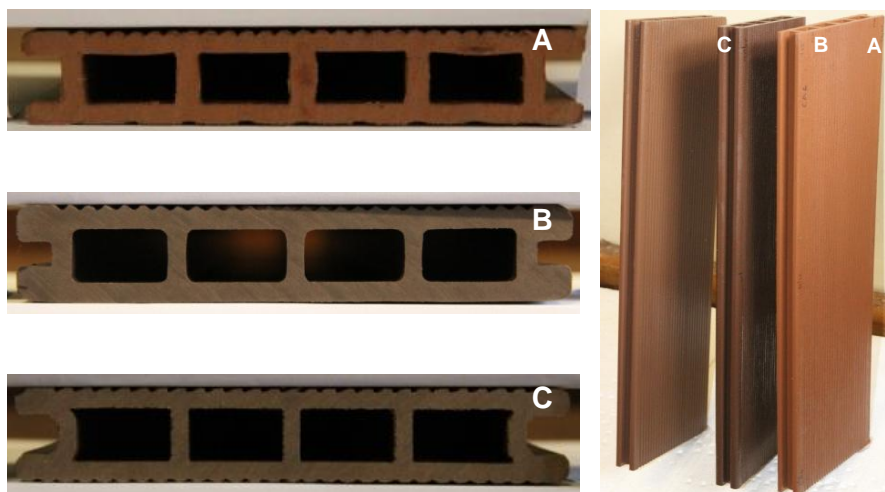


Figura 3.1 – Perfis dos materiais A, B e C.

3.3 Ensaios de caracterização

Na presente Dissertação foram realizados ensaios para determinação do comportamento a longo prazo das régua de compósitos madeira-plástico com perfil alveolar.

Os ensaios do comportamento a longo prazo compreenderam três ensaios: resistência à humidade (envelhecimento acelerado), variação dimensional e de módulo de elasticidade devido à imersão em água e variação dimensional e de módulo de elasticidade devido a ambiente húmido.

Foi efetuada, em colaboração com o Grupo de Florestas e Produtos Florestais do Instituto de Investigação Científica Tropical (IICT), uma análise da composição dos compósitos através de espectroscopia de infravermelho médio (ATR-FTIR). Para cada amostra foram obtidos espectros em duplicado num espectrofotómetro FTIR da Bruker (Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany) modelo ALPHA-P com um acessório de refletância total atenuada (ATR), de cristal de diamante, de reflexão simples. Os espectros foram obtidos na região dos números de onda entre os 4000 e os 400 cm^{-1} , com uma resolução de 4 cm^{-1} . Cada espectro é o resultado da co-adição de 24 varrimentos. A obtenção dos espectros e o seu processamento é efetuada com o software OPUS (Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Germany). No Anexo 1 apresentam-se os resultados obtidos nessa análise.

Antes de serem submetidos a ensaio os provetes foram condicionados num ambiente de 20 ± 2 °C de temperatura e $65 \pm 5\%$ de humidade relativa do ar. Os provetes foram considerados condicionados quando a diferença de peso obtida num período de tempo de 24 horas se situou abaixo dos 0,1%.

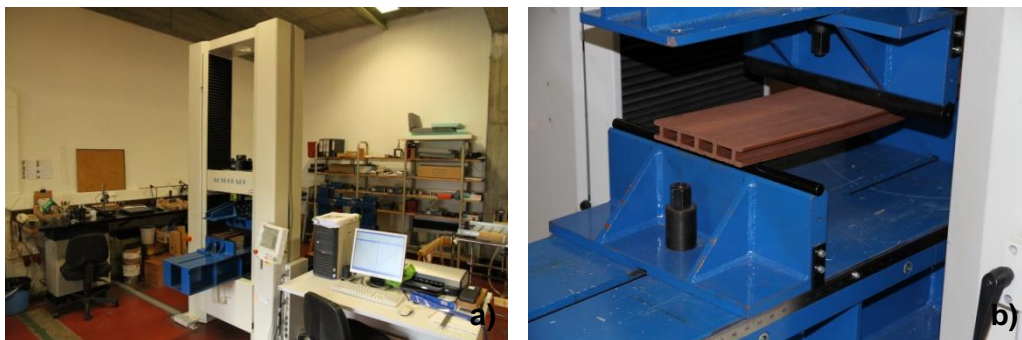
Foi efetuada uma caracterização inicial do material a ensaiar, através da medição da espessura e largura em três pontos por meio de paquímetro com precisão de 0,1 mm, da medição do comprimento em dois pontos com régua metálica com precisão de 1 mm, da medição do respetiva massa inicial com uma balança com precisão de 0,01 g, Figura 3.2.



a) Medição do comprimento do provete; b) Medição da largura do provete.

Figura 3.2 – Determinação de dimensões.

Foi também determinado o módulo de elasticidade inicial do material através da expressão 2.2 realizando o ensaio de pré-carga, segundo a aplicação de uma força no meio de um provete suportado por dois apoios, utilizando o respetivo declive da parte retilínea da curva carga-deformação fornecido pela máquina de ensaios universal Shimadzu AG-250, com célula de carga de 250 kN e classe 1 de exatidão, Figura 3.3.



a) Máquina de ensaios Shimadzu AG-250; b) Pormenor da aplicação de carga.

Figura 3.3 – Ensaio de aplicação carga aos provetes.

De seguida apresenta-se a lista de ensaios realizados:

- Ensaio de flexão para determinação da pré-carga
- Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido à imersão em água
- Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido a ambiente húmido
- Ensaio de resistência à humidade

3.3.1 Ensaio de flexão para determinação da pré-carga

A avaliação da alteração do módulo de elasticidade do material ao longo dos ensaios foi realizada através de ensaios de pré-carga, garantindo uma aplicação de carga dentro da região de comportamento elástico do material à flexão.

Para a definição da força máxima a aplicar a cada provete (correspondente a 40% da carga última) foi necessário determinar um valor de referência para a carga de rutura do respetivo material. Este valor de referência foi determinado através do ensaio de flexão estática de acordo com a NP EN 310 (2002) [13], para um conjunto de 10 provetes de cada material.

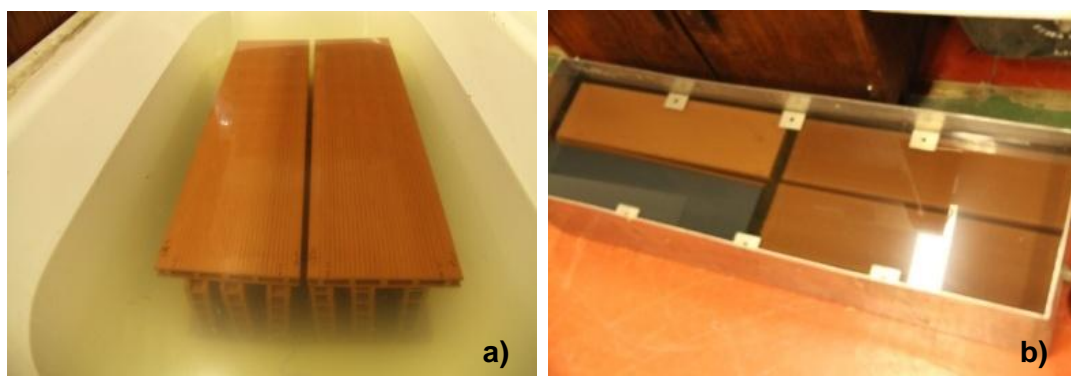
Na Tabela 3.2 apresentam-se os valores que definem a força de pré-carga.

Tabela 3.2 - Valores que definem a força de pré-carga.

Material	Carga última (kN)	Força de pré carga (kN)
A	1,71	0,68
B	1,95	0,78
C	3,95	1,58

3.3.2 Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido à imersão em água

O ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido à imersão em água foi realizado através imersão completa dos provetes em água limpa, Figura 3.4, com pH de 7 ± 1 e a uma temperatura de 20 ± 1 °C, avaliando aumento de inchamento de acordo com a norma NP EN 317 (2002) [14], expressão 2.1, e a resistência à humidade através da perda de módulo de elasticidade à flexão de acordo com a norma NP EN 310 (2002) [13], expressão 2.2.



a) Imersão dos provetes do material A; b) Imersão dos provetes do material B e C.

Figura 3.4 – Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido à imersão em água.

Estando os provetes condicionados procedeu-se à determinação das características geométricas (largura, espessura e comprimento) dos provetes, por meio de um paquímetro com precisão de 0,1 mm e de uma régua com precisão de 1 mm. A largura e a espessura foram medidas em três pontos distribuídos no comprimento dos provetes e o comprimento foi medido em dois pontos distribuídos ao longo da largura dos provetes. O procedimento foi adaptado da norma europeia NP EN 325 (2013) [16].

Foram efetuadas medições de espessura, comprimento, largura, peso e realizado o ensaio de pré-carga, com uma periodicidade de duas semanas correspondendo a medição inicial à medição 0.

As Figuras 3.5 a 3.7 apresentam os valores médios do inchamento em espessura, largura e comprimento dos materiais A, B e C ao longo do ensaio.

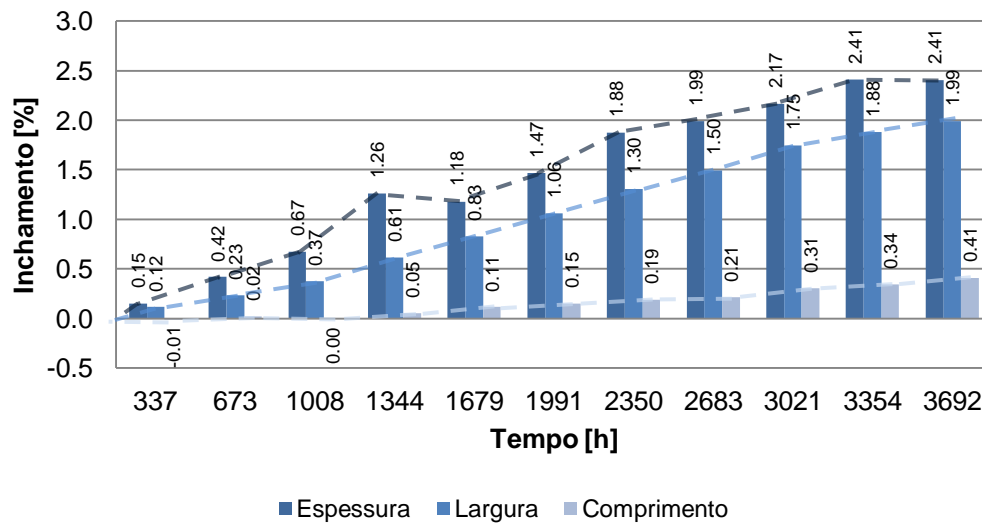


Figura 3.5 – Valores médios do inchamento do material A imerso em água.

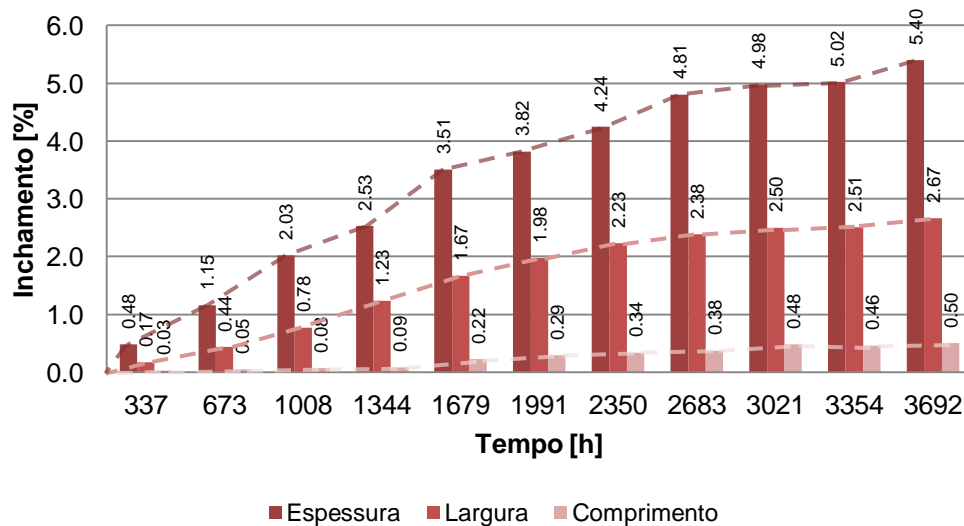


Figura 3.6 – Valores médios do inchamento do material B imerso em água.

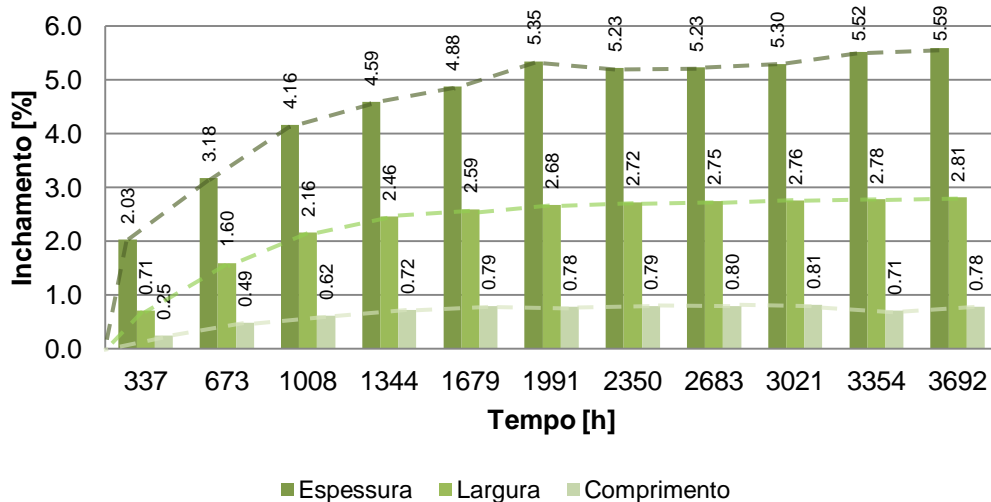


Figura 3.7 – Valores médios do inchamento do material C imerso em água.

As Tabelas 3.3 e 3.4 apresentam respetivamente os valores médios e desvios padrão da massa e dos módulos de elasticidade dos materiais A, B e C ao longo do ensaio.

No Anexo 2, Tabelas II.1 a II.3, encontram-se os valores individuais de massa e de módulo de elasticidade de cada provete.

Tabela 3.3 - Valores médios e desvio padrão da massa dos materiais A, B e C imersos em água.

Tempo (h)	Massa (g)					
	Material A		Material B		Material C	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	1383,58	59,80	1377,80	31,36	1365,81	8,02
337	1421,02	63,61	1427,30	37,61	1425,64	7,32
673	1441,10	68,52	1450,27	41,02	1458,58	7,37
1008	1451,78	68,83	1469,23	44,03	1484,01	8,61
1344	1464,03	78,62	1485,09	47,07	1497,51	8,22
1679	1464,18	55,98	1496,89	48,11	1501,98	8,77
1991	1482,24	84,63	1507,50	47,20	1505,91	7,65
2350	1492,63	84,13	1516,28	44,98	1504,18	7,84
2683	1498,26	83,25	1522,01	43,39	1506,02	7,92
3021	1508,71	82,39	1530,24	41,53	1506,72	6,89
3354	1511,05	82,67	1529,74	40,75	1505,42	6,99
3692	1512,84	80,88	1530,92	38,34	1505,85	6,95

Tabela 3.4 - Valores médios e desvio padrão dos módulos de elasticidade dos materiais A, B e C imersos em água.

Tempo (h)	Módulo de elasticidade (MPa)					
	Material A		Material B		Material C	
	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão	Média	Desvio padrão
0	2324,80	256,18	5319,02	211,07	6492,65	154,90
337	2074,76	172,88	4306,20	331,75	5216,32	96,01
673	1954,05	237,49	3962,26	183,80	4563,00	156,14
1008	1886,17	212,16	3758,14	252,52	4121,12	142,21
1344	1666,36	179,90	3262,24	324,56	3932,73	157,87
1679	1566,51	212,12	2906,58	294,74	3870,69	145,70
1991	1445,64	247,58	2735,91	251,46	3917,03	186,64
2350	1360,20	262,47	2576,49	217,52	3933,27	192,75
2683	1315,88	298,74	2538,06	190,41	3996,31	148,55
3021	1149,15	348,88	2365,77	217,39	3912,99	191,69
3354	1177,95	292,17	2429,21	213,43	3971,84	186,33
3692	1115,39	319,52	2447,78	231,62	3977,73	150,58

As Figuras 3.8 a 3.10 apresentam os valores médios de massa e dos módulos de elasticidade dos materiais A, B e C.

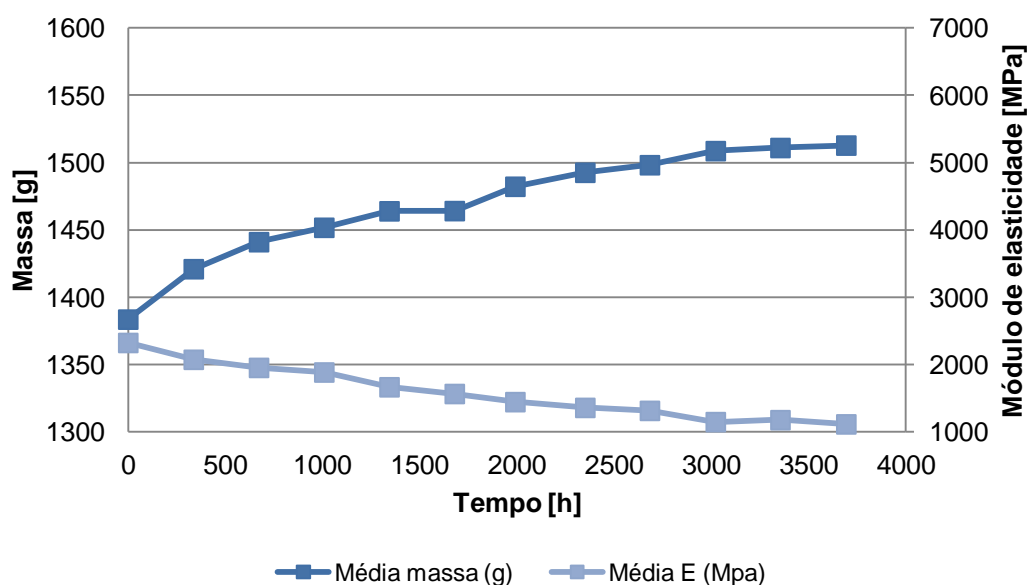


Figura 3.8 – Valores médios dos módulos de elasticidade e da massa dos dez provetes do material A imersos em água.

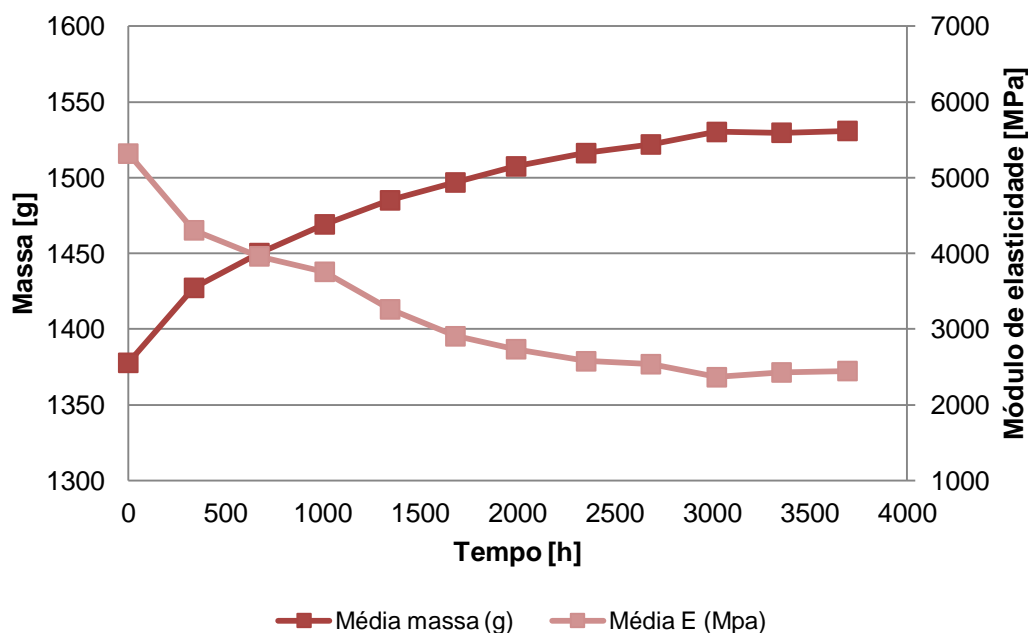


Figura 3.9 – Valores médios dos módulos de elasticidade e da massa dos dez provetes do material B imersos em água.

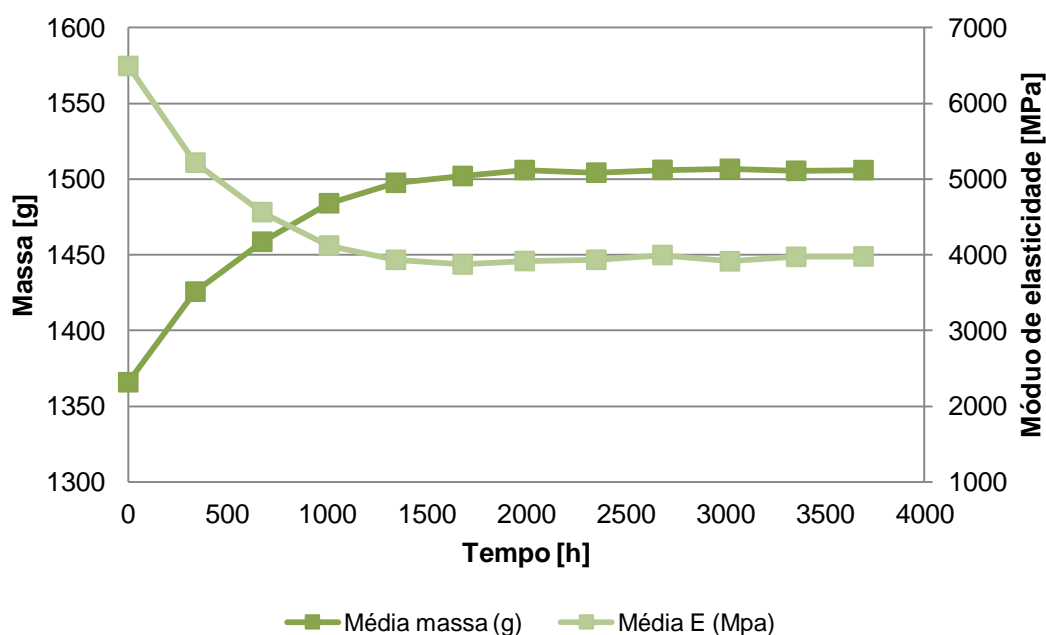


Figura 3.10 – Valores médios dos módulos de elasticidade e da massa dos dez provetes do material C imersos em água.

Nas Figuras 3.5 a 3.7 verifica-se que o maior inchamento ocorre em espessura, seguido da largura e do comprimento. Após 22 semanas de imersão, pode verificar-se que o inchamento em espessura situa-se entre os 2,4% e os 5,6%, o inchamento em largura entre os 2,0% e os 2,8% e o inchamento em comprimento entre os 0,4% e os 0,8%. O material B e C apresentam valores semelhantes de inchamento.

Na Tabela 3.4 verifica-se que o valor de módulo de elasticidade dos materiais B e C após 22 semanas de imersão é superior ao valor inicial do material A, sendo estes assim mais rígidos após este período de imersão que o material A antes de iniciar os ensaios.

Das Figuras 3.8 a 3.10 é possível verificar que o material C foi o primeiro a estabilizar, correspondendo aproximadamente a um período de 12 semanas de imersão (medição nº 6).

3.3.3 Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido a ambiente húmido

O ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido a ambiente húmido foi realizado através da colocação dos provetes numa câmara com uma solução saturada de sais [Sulfato de amónio - $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$] de forma a obter uma humidade relativa de aproximadamente 80%, Figura 3.11, tendo sido avaliada a influência do meio húmido no aumento de inchamento de acordo com a norma NP EN 317 (2002) [14], expressão 2.1, e na perda de módulo de elasticidade à flexão de acordo com a norma NP EN 310 (2002) [13], expressão 2.2.

Estando os provetes condicionados procedeu-se à determinação das características geométricas (largura, espessura e comprimento) dos provetes, por meio de um paquímetro com precisão de 0,1 mm e de uma régua com precisão de 1 mm. A largura e a espessura foram medidas em três pontos distribuídos no comprimento dos provetes e o comprimento foi medido em dois pontos distribuídos ao longo da largura dos provetes. O procedimento foi adaptado da norma europeia NP EN 325 (2013) [16].

Foram efetuadas medições de espessura, comprimento, largura, peso e realizado o ensaio de pré-carga, com uma periodicidade inicial de 2 semanas, tendo sido alargada a periodicidade para 4 semanas após as quatro primeiras semanas devido ao efeito da humidade ser relativamente baixo, correspondendo a medição inicial à medição 0.



Figura 3.11 – Câmara de sais

As Figuras 3.12 a 3.14 apresentam os valores médios do inchamento em espessura, largura e comprimento dos materiais A, B e C ao longo do ensaio. Nestas figuras (tal como nas figuras 4.7 a 4.11) não existem linhas auxiliares a unir os gráficos pois a escala de tempo não é proporcional.

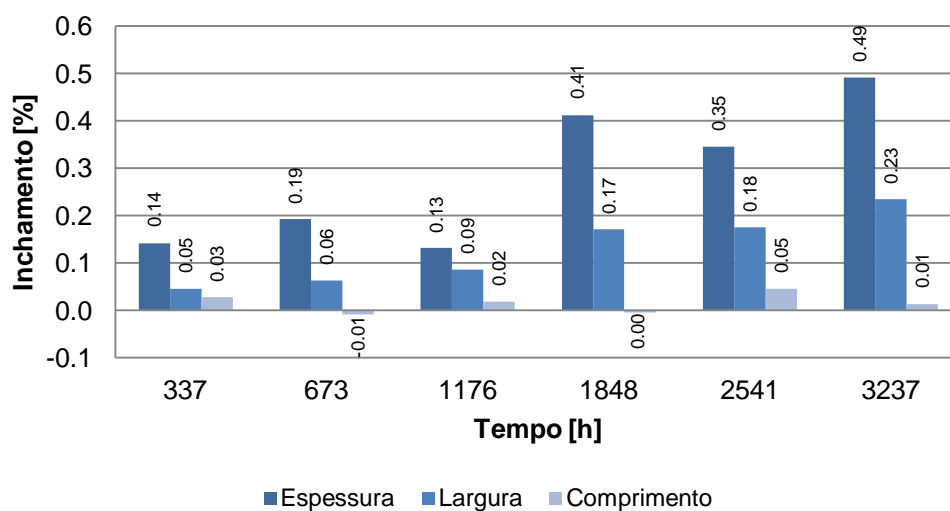


Figura 3.12 – Valores médios do inchamento do material A em ambiente húmido.

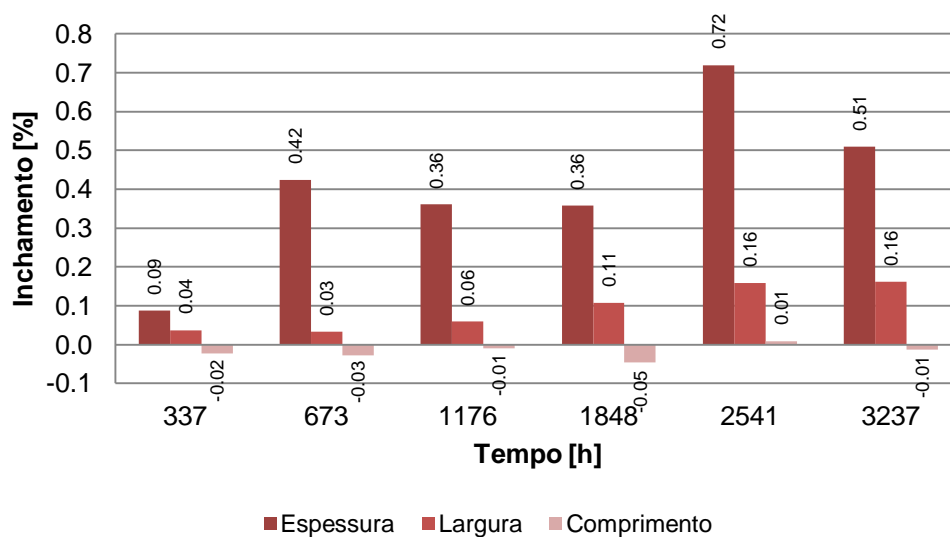


Figura 3.13 – Valores médios do inchamento do material B em ambiente húmido.

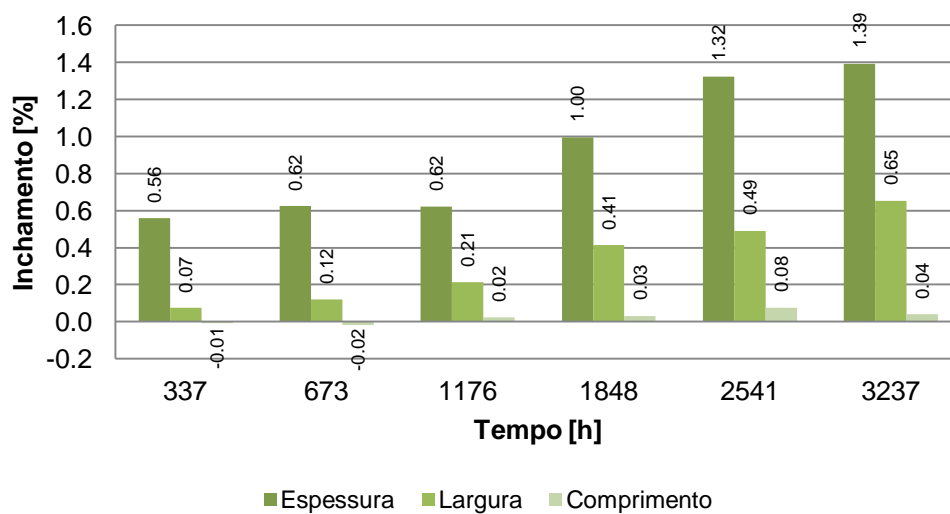


Figura 3.14 – Valores médios do inchamento do material C em ambiente húmido.

As Tabelas 3.5 e 3.6 apresentam respectivamente os valores médios e desvios padrão da massa e dos módulos de elasticidade dos materiais A, B e C ao longo do ensaio.

No Anexo 3, Tabelas III.1 a III.3, encontram-se os valores individuais de massa e de módulo de elasticidade de cada provete.

Tabela 3.5 - Valores médios e desvio padrão da massa dos materiais A, B e C em ambiente húmido.

Tempo (h)	Massa (g)					
	Material A		Material B		Material C	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
0	1374,20	48,24	1384,23	30,66	1361,99	4,88
337	1375,56	48,18	1385,25	30,66	1364,86	5,51
673	1376,31	48,12	1385,86	30,66	1366,61	5,60
1176	1377,65	48,08	1387,37	30,75	1370,16	5,77
1848	1379,69	47,99	1389,42	30,83	1375,50	5,91
2541	1381,29	47,92	1391,13	30,92	1378,79	6,15
3237	1383,10	47,86	1393,17	30,98	1382,76	6,22

Tabela 3.6 - Valores médios e desvio padrão dos módulos de elasticidade dos materiais A, B e C em ambiente húmido.

Tempo (h)	Módulo de elasticidade (MPa)					
	Material A		Material B		Material C	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
0	2251,29	114,00	5430,18	279,89	6583,23	286,71
337	2266,43	115,93	5428,14	378,66	6650,25	304,75
673	2272,18	106,16	5399,40	320,93	6612,79	304,73
1176	2132,28	93,57	5023,56	284,97	6334,51	298,80
1848	2053,66	113,11	4888,29	384,70	6099,04	312,83
2541	2198,84	114,72	4937,30	332,75	6297,04	282,36
3237	2175,11	109,28	5217,61	320,84	6170,85	307,41

As Figuras 3.15 a 3.17 apresentam os valores médios de massa e dos módulos de elasticidade dos materiais A, B e C.

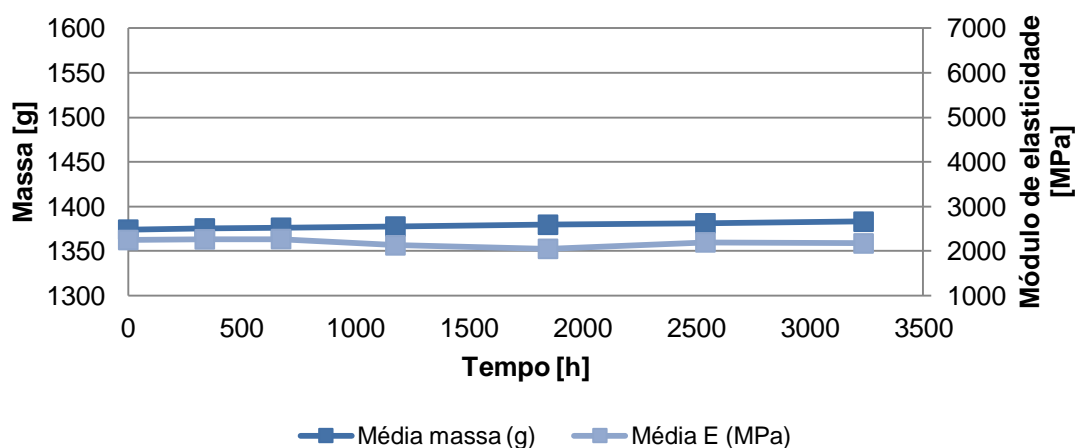


Figura 3.15 – Valores médios dos módulos de elasticidade e da massa dos dez provetes do material A em ambiente húmido.

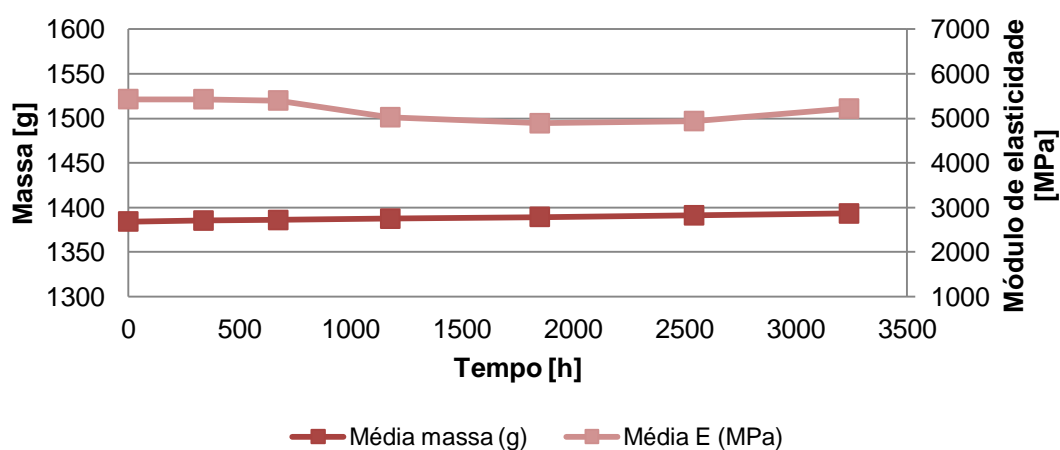


Figura 3.16 – Valores médios dos módulos de elasticidade e da massa dos dez provetes do material B em ambiente húmido.

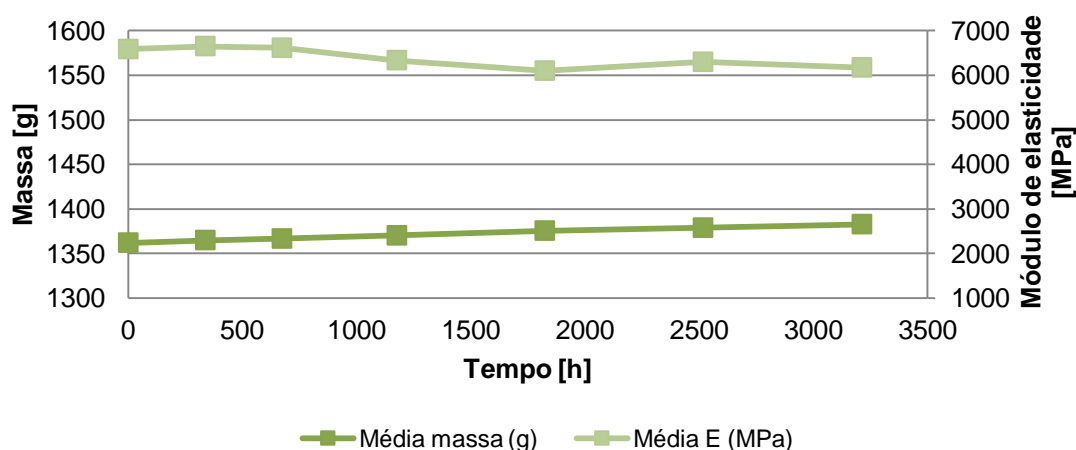


Figura 3.17 – Valores médios dos módulos de elasticidade e da massa dos dez provetes do material C em ambiente húmido.

Nas Figuras 3.12 a 3.14 verifica-se que o maior inchamento em espessura, seguido da largura e do comprimento.

Após 19 semanas (6 medições) de exposição na câmara, pode verificar-se que o inchamento em espessura situa-se entre os 0,5% (materiais A e B) e os 1,4% (material C), o inchamento em largura entre os 0,2% (materiais A e B) e os 0,7% (material C) e o inchamento em comprimento de aproximadamente 0%.

Nas Figuras 3.15 a 3.17 verifica-se que, tanto o aumento de massa, como a diminuição de módulo de elasticidade apresentam valores baixos e pouco significativos ao longo do ensaio.

3.3.4 Ensaio de resistência à humidade

O ensaio de resistência à humidade foi realizado sujeitando os provetes a um ensaio cíclico de envelhecimento acelerado de acordo com a norma NP EN 321 (2010) [15], avaliando aumento de inchamento de acordo com a norma NP EN 317 (2002) [14], expressão 2.1, e a resistência à humidade através da perda de módulo de elasticidade à flexão de acordo com a norma NP EN 310 (2002) [13], expressão 2.2.

Estando os provetes condicionados, procedeu-se à determinação das características geométricas (largura, espessura e comprimento) dos provetes, por meio de um paquímetro com precisão de 0,1 mm e de uma régua com precisão de 1 mm (Inicial). A largura e a espessura foram medidas em três pontos distribuídos no comprimento dos provetes e o comprimento foi medido em dois pontos distribuídos ao longo da largura dos provetes. O procedimento foi adaptado da norma europeia NP EN 325 (2013) [16].

Os provetes foram expostos a três ciclos, incluindo cada um deles uma fase de imersão em água, Figura 3.18 a), b) e c), uma fase de congelamento, Figura 3.18 d), e uma fase de secagem, Figura 3.18 e).

O primeiro ciclo iniciou-se pela imersão dos provetes durante 70 ± 1 h em água limpa, com $\text{pH} = 7 \pm 1$ e a uma temperatura de 20 ± 1 °C, Figura 3.18 a).

Após esse período os provetes foram retirados da água. Deixaram-se escorrer durante alguns minutos e foram efetuadas medições (Im1) de espessura, comprimento, largura, peso e por fim realizado o ensaio de pré-carga. De seguida os provetes foram colocados na câmara de congelação durante 24 ± 1 h, a uma temperatura entre -12 °C e -25 °C, Figura 3.18 d).

Após o período de congelação, os provetes foram retirados da câmara de congelação e colocados imediatamente na estufa de secagem durante 70 ± 1 h a uma temperatura de 70 ± 2 °C, Figura 3.18 e).

Após o período de secagem, os provetes foram retirados da estufa de secagem e colocados num local a uma temperatura de 20 ± 2 °C. Foram efetuadas medições (E1) de espessura, comprimento, largura, peso e realizado ensaio de pré-carga. De seguida procedeu-se a um período de arrefecimento de $4 \pm 0,5$ h.

No final do período de arrefecimento os provetes, foram sujeitos a um segundo (Im2, E2) e terceiro ciclo (Im3, E3), seguindo-se em ambos os ciclos as mesmas fases do primeiro.

Após o final do terceiro ciclo, os provetes foram recondicionados, até atingirem massa constante (variação de massa entre duas pesagens consecutivas inferior a 0,1%).

Foram efetuadas medições de espessura, comprimento, largura, peso e realizado o ensaio de pré-carga (Final).



a) Imersão dos provetes em água; b) Provetes na câmara de congelação; c) Provetes na estufa.

Figura 3.18 – Ensaio de resistência à humidade

As Figuras 3.19 a 3.21 apresentam os valores médios do inchamento em espessura, largura e comprimento dos materiais A, B e C ao longo do ensaio.

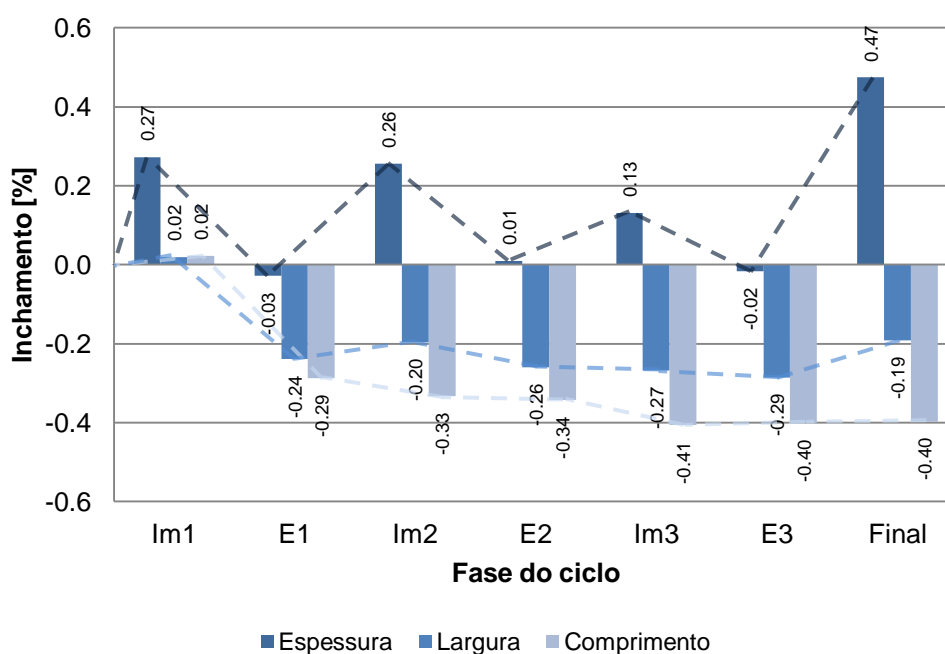


Figura 3.19 – Valores médios do inchamento do material A no ensaio de resistência à humidade.

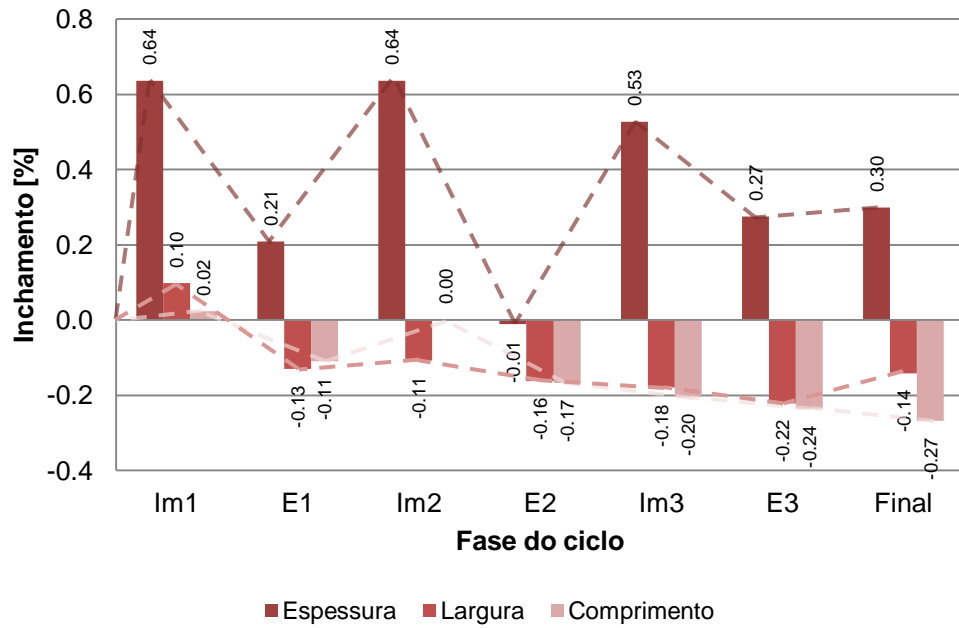


Figura 3.20 – Valores médios do inchamento do material B no ensaio de resistência à humidade.

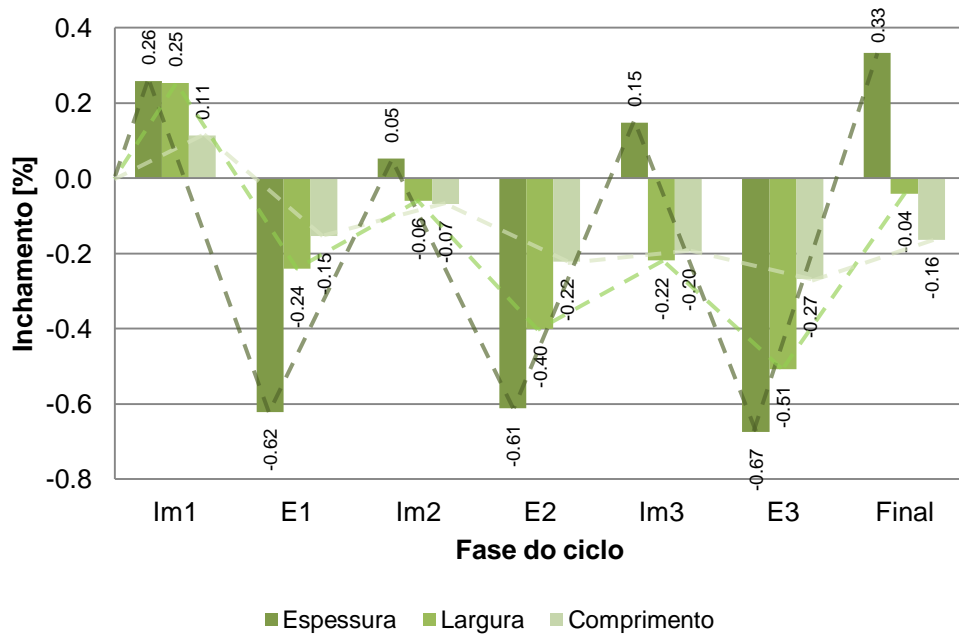


Figura 3.21 – Valores médios do inchamento do material C no ensaio de resistência à humidade.

A Tabela 3.7 e a Figura 3.22 apresentam os valores médios da massa dos materiais A, B e C para cada respetivo ciclo.

No Anexo 4, Tabelas IV.1 a IV.3, encontram-se os valores individuais de massa de cada provete.

Tabela 3.7 - Valores médios e desvio padrão da massa dos materiais A, B e C no ensaio de resistência à humidade.

Ciclo	Fase	Massa (g)					
		Material A		Material B		Material C	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP
1º	Inicial	1408,8	73,8	1404,6	51,5	1360,7	8,1
	Imersão (Im1)	1431,8	75,5	1432,0	47,3	1387,2	8,0
	Estufa (E1)	1396,7	73,5	1393,3	52,4	1325,7	6,8
2º	Imersão (Im2)	1421,4	74,7	1420,2	48,7	1367,0	7,0
	Estufa (E2)	1394,1	73,9	1390,6	52,6	1318,8	6,2
3º	Imersão (Im3)	1425,0	91,1	1415,0	48,9	1361,1	6,5
	Estufa (E3)	1392,8	74,1	1389,1	52,6	1315,8	6,1
Final		1405,0	75,0	1402,2	51,1	1356,5	6,5

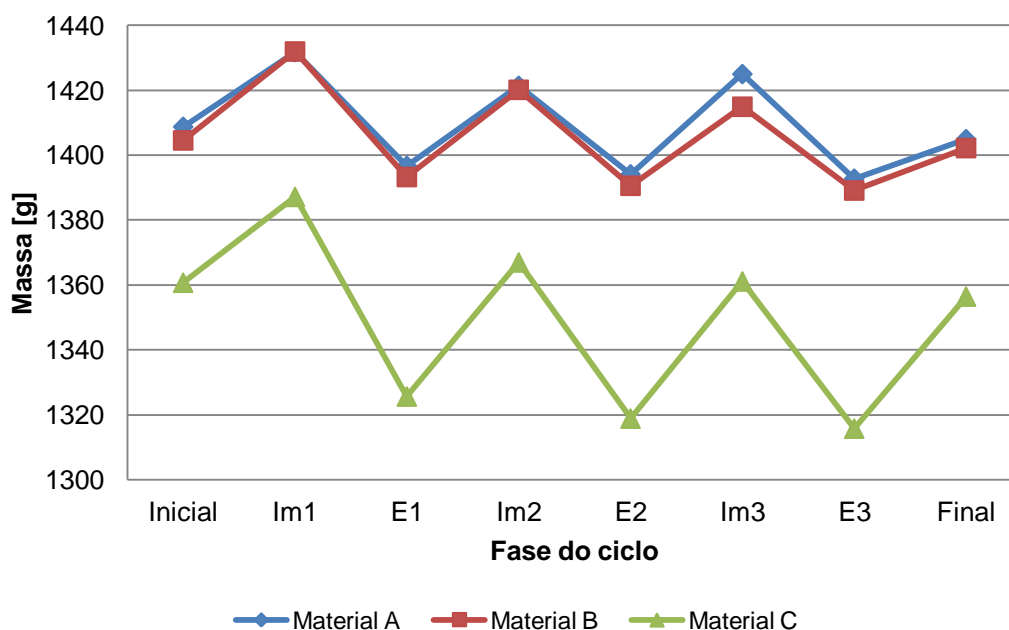


Figura 3.22 - Valores médios da massa dos materiais A, B e C no ensaio de resistência à humidade.

As Figuras 3.23 a 3.25 apresentam os valores dos módulos de elasticidade de cada um dos dez provetes dos materiais A, B e C, para cada fase dos três ciclos do ensaio.

No Anexo 4, Tabelas IV.1 a IV.3, encontram-se os valores individuais de módulo de elasticidade de cada provete.

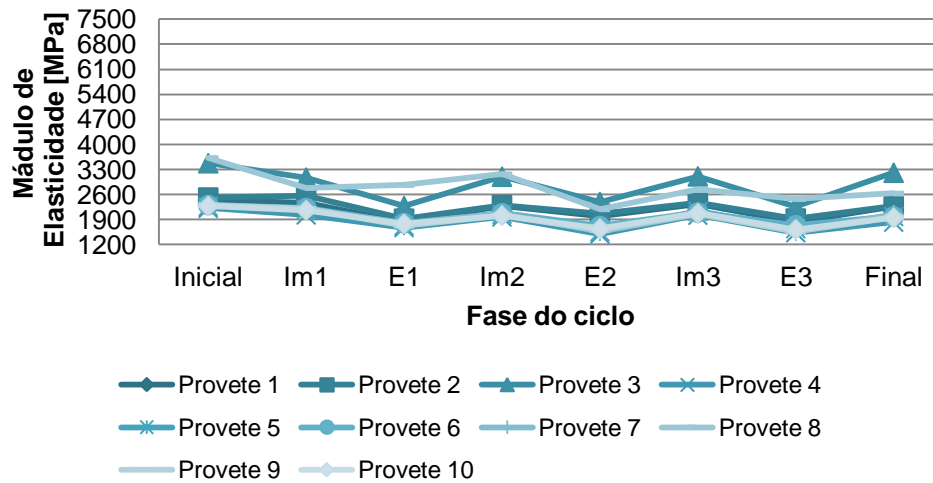


Figura 3.23 - Valores dos módulos de elasticidade dos dez provetes do material A no ensaio de resistência à humidade.

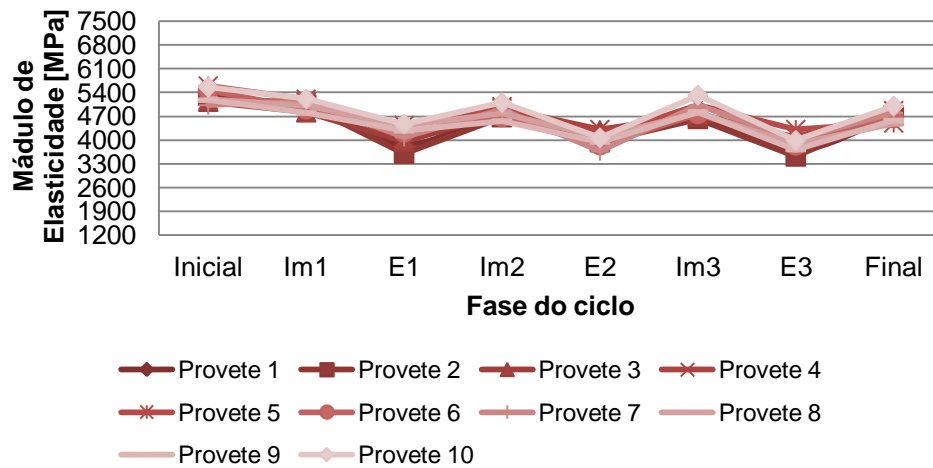


Figura 3.24 - Valores dos módulos de elasticidade dos dez provetes do material B no ensaio de resistência à humidade.

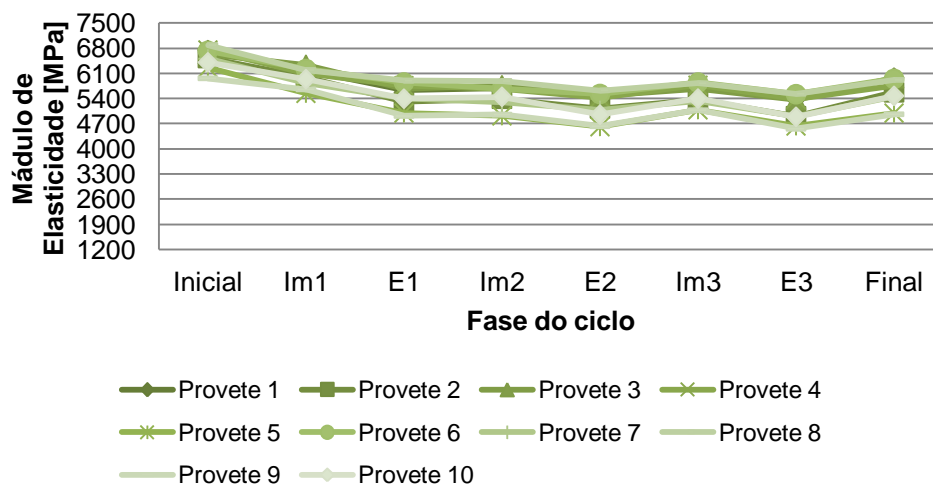


Figura 3.25 - Valores dos módulos de elasticidade dos dez provetes do material C no ensaio de resistência à humidade.

A Tabela 3.8 e a Figura 3.26 apresentam os valores médios dos módulos de elasticidade dos materiais A, B e C para cada respetivo ciclo.

Tabela 3.8 - Valores médios e desvio padrão dos módulos de elasticidade materiais A, B e C no ensaio de resistência à humidade.

Ciclo	Fase	Módulo de elasticidade (MPa)					
		Material A		Material B		Material C	
		Média	DP	Média	DP	Média	DP
	Inicial	2575	522	5275	198	6541	276
1º	Imersão (Im1)	2379	330	5021	151	6001	260
	Estufa (E1)	1940	368	4139	280	5482	340
2º	Imersão (Im2)	2304	451	4808	167	5470	334
	Estufa (E2)	1826	312	4045	202	5195	373
3º	Imersão (Im3)	2301	361	4854	214	5509	296
	Estufa (E3)	1818	320	3899	223	5108	369
Final		2213	420	4703	162	5603	385

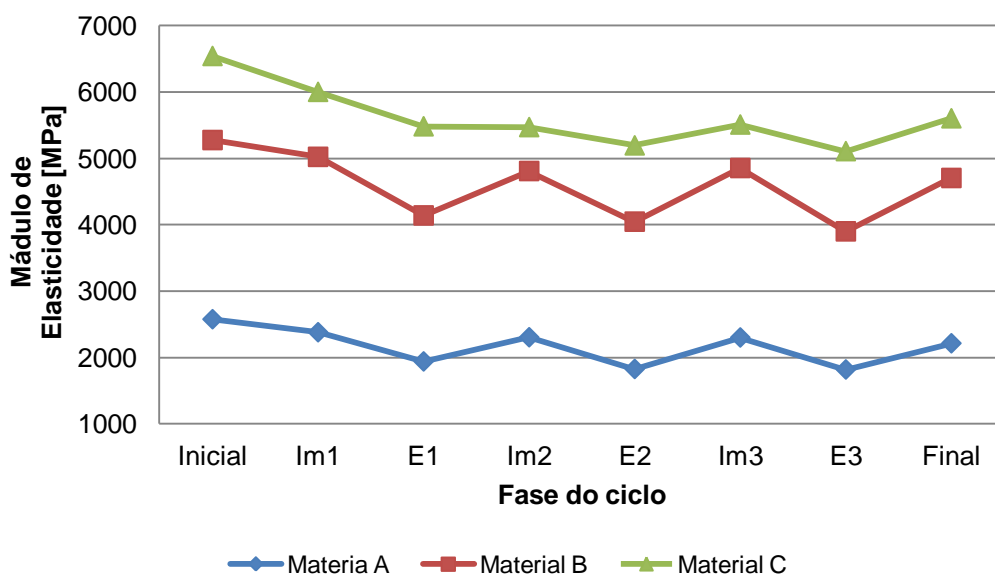


Figura 3.26 - Valores médios dos módulos de elasticidade no ensaio de resistência à humidade.

Nas Figuras 3.19 a 3.21 verifica-se que as maiores variações de inchamento são em espessura, sendo as variações de inchamento em largura e comprimento ligeiramente inferiores. Os valores de inchamento nunca ultrapassam o valor de 1% neste ensaio.

Na Tabela 3.7 e na Figura 3.22 verifica-se que ao nível da absorção de água o material A e B apresentam um comportamento semelhante, sendo o material C o que apresenta maiores variações de massa. Pode-se verificar que o material C é o que apresenta uma maior diminuição de massa nas fases de secagem.

Na Tabela 3.8 e na Figura 3.26, observa-se que o material C para além de possuir um maior módulo de elasticidade é também o material que possui em média uma oscilação de módulos de elasticidade menor, apesar de ser o material que apresenta a maior perda de módulo de elasticidade. O material B também possui grandes oscilações de módulo de elasticidade, mas no final é o material que possui menos perdas pois acaba por ser o que tem uma maior recuperação. Para os três materiais, como seria expectável pois os ensaios decorrem em regime elástico, existem duas fases em que o material recupera parte do módulo de elasticidade, mas mantendo sempre uma perda residual, correspondendo à imersão dois e três.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

4.1 Considerações iniciais

No presente capítulo são discutidos os resultados obtidos na campanha experimental apresentados no Capítulo 3. No final, os resultados são comparados com os dos autores indicados na secção 2.5. A metodologia adotada permitiu analisar a evolução das características físicas e mecânicas de provetes de compósito madeira-plástico quando sujeitos a diferentes condições de humidificação.

Neste enquadramento determinou-se, em relação ao comportamento dos provetes estudados:

- A influência da humidade ao nível do inchamento em espessura, largura e comprimento.
- A influência da humidade na absorção de água.
- A influência da humidade na perda de módulo de elasticidade.
- A relação entre absorção de água e perda de módulo de elasticidade dos provetes imersos em água.

4.2 Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido à imersão em água

A comparação entre os três tipos diferentes de materiais ensaiados ao nível do inchamento em espessura, largura e comprimento pode ser observada nas Figuras 4.1 a 4.3.

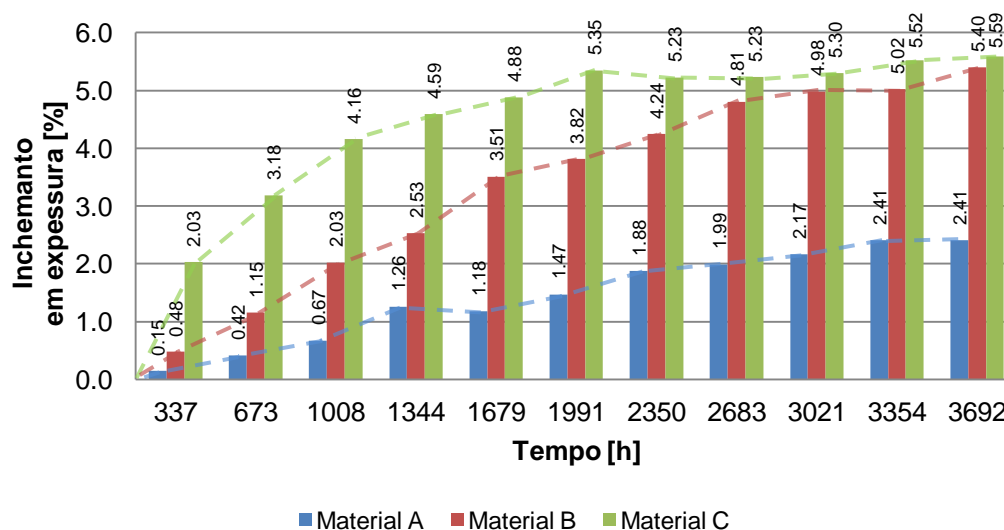


Figura 4.1 - Valores médios do inchamento em espessura dos materiais A, B e C imersos em água.

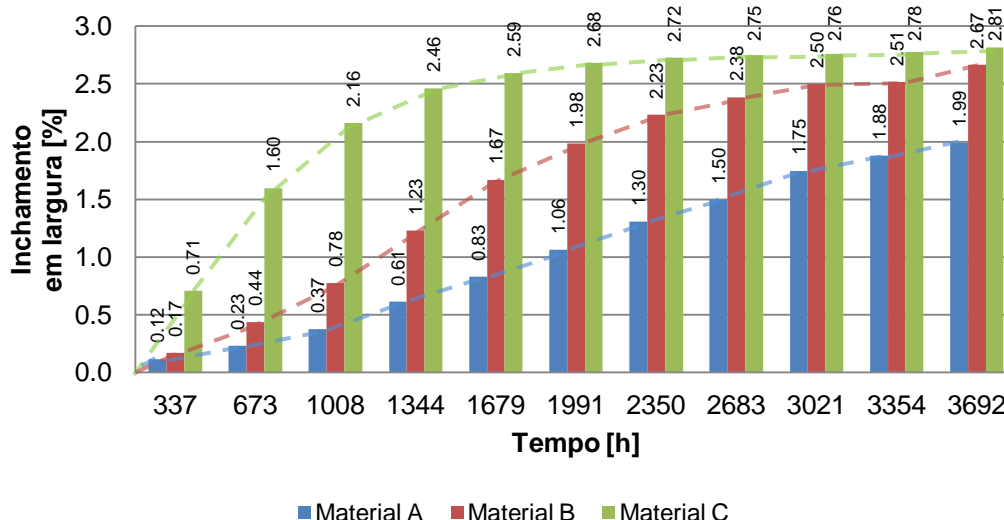


Figura 4.2 - Valores médios do inchamento em largura dos materiais A, B e C imersos em água.

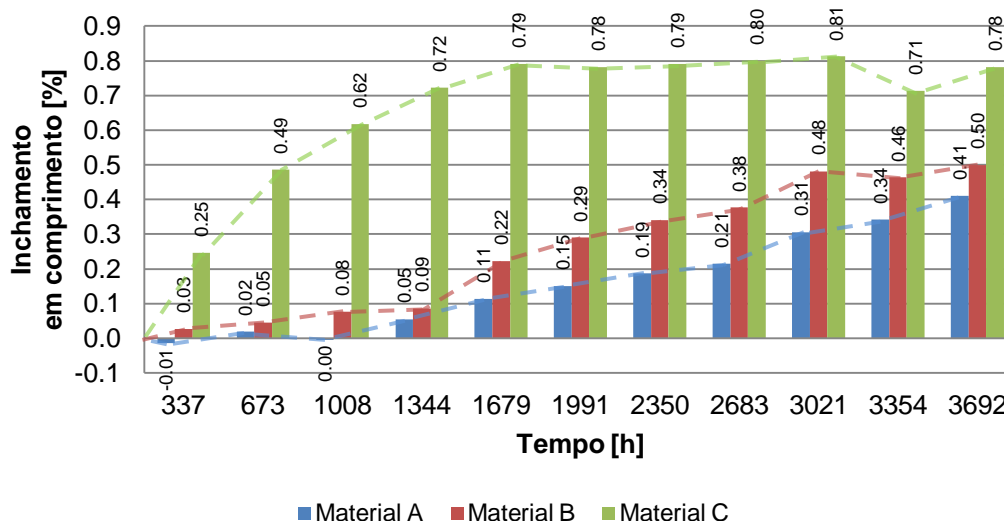


Figura 4.3 - Valores médios do inchamento em comprimento dos materiais A, B e C imersos em água.

Da análise das Figuras 4.1 a 4.3 verifica-se que estes materiais incham cerca de 2,4% a 5,6% em espessura, 2,0% a 2,8% em largura e 0,4% a 0,8% em comprimento. Dos três materiais constata-se que o material A é o que apresenta menores variações dimensionais quando imerso em água, seguido respetivamente do material B e C.

Os dados do inchamento em comprimento da 1ª e 3ª medição do material A são incoerentes, pois não faz sentido os provetes diminuírem de dimensão ao absorver água, podendo dever-se a erros de leituras, uma vez que a precisão de leitura do comprimento é a menos precisa, conjugada com pequenas variações dimensionais observadas no início dos ensaios.

Na Figura 4.4, apresenta-se a comparação da variação de massa em relação à medição inicial, ao longo das medições efetuadas entre os três provetes. No Anexo 2, Tabelas II.1 a II.3, encontram-se os valores individuais da variação de massa em relação à medição inicial.

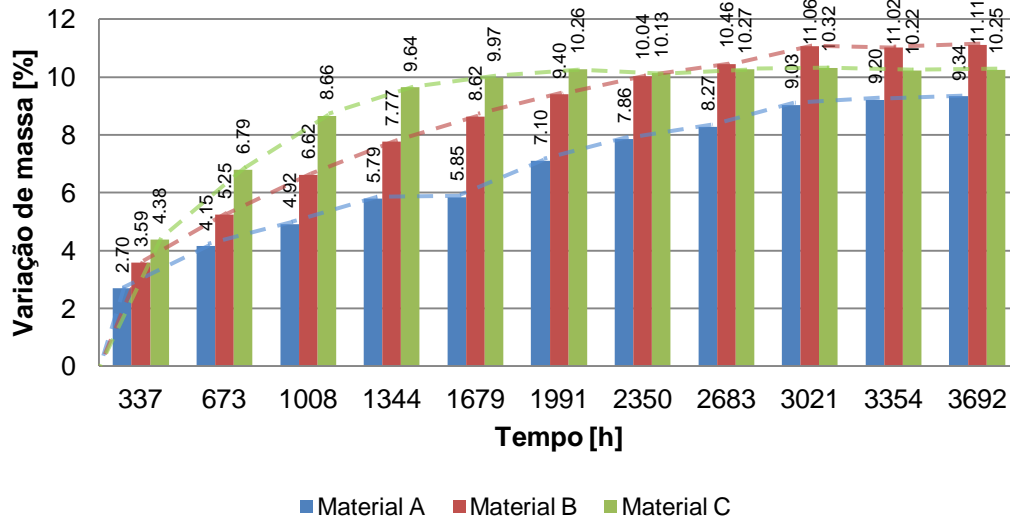


Figura 4.4 – Valores médios da variação de massa em relação à medição inicial dos materiais A, B e C imersos em água.

Da análise da Figura 4.4 constata-se que o material C apresenta maior tendência para absorver água inicialmente, sendo também o material que atingiu o período de estabilização mais cedo (medição 6, 12 semanas). Pode verificar-se que os três materiais após 11 medições (22 semanas) apresentam valores de absorção de água semelhantes, entre os 9% e os 11%.

Na Figura 4.5, apresenta-se a comparação entre os três provetes quanto à variação de módulo de elasticidade em relação à medição inicial, ao longo das medições efetuadas.

No Anexo 2, Tabelas II.1 a II.3, encontram-se os valores individuais da variação de módulo de elasticidade em relação à medição inicial.

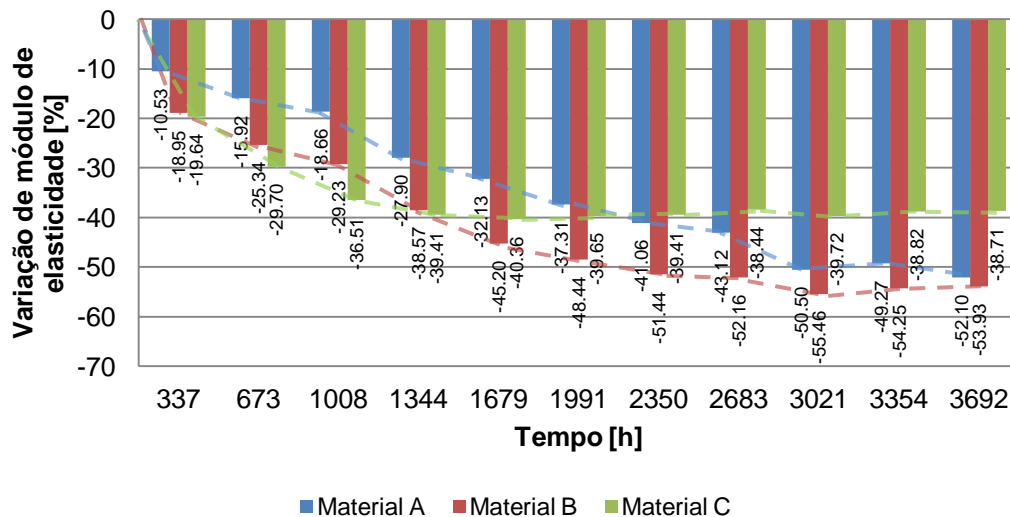


Figura 4.5 – Valores médios da variação de módulos de elasticidade em relação à medição inicial dos materiais A, B e C imersos em água.

Da Figura 4.5 é possível observar que o material C é o que possui maior perda de módulo de elasticidade nas 3 primeiras medições (6 semanas), sendo que, a partir da 5ª medição (10 semanas), esse valor se mantém constante, de aproximadamente 40% de perda.

Após a medição 5 (décima semana) passa a ser o material B a possuir as maiores perdas de módulo de elasticidade, cerca de 45%. Após 11 medições (22 semanas) o material B é o que apresenta maiores perdas (54%), seguido do material A (52%) e do material C (39%). Apesar do material A possuir menor perda comparativamente ao B, importa referir que o material A ainda não se encontra estabilizado, devendo aumentar ainda as suas perdas. Ao apresentar um reduzido módulo de elasticidade inicial, comparativamente aos restantes, possuindo perdas de cerca 50%, acaba por ser o caso mais gravoso de entre os três materiais sujeitos a ensaio, como seria espectável, pois representa um material de inferior qualidade.

Na Figura 4.6, relaciona-se a absorção de água e a perda de módulo de elasticidade

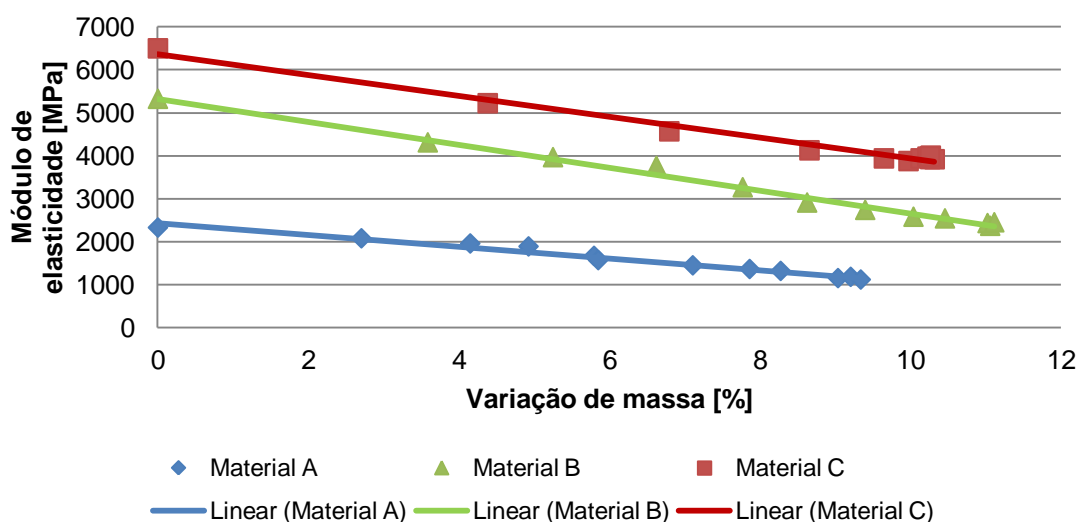


Figura 4.6 – Correlação entre a variação de massa e o módulo de elasticidade dos materiais A, B e C

Da Figura 4.6 pode ser verificada uma forte dependência entre a absorção de água e a diminuição de módulo de elasticidade, dando a entender a existência de uma linearidade entre a absorção de água e a perda de módulo de elasticidade.

Assim a correlação entre módulo de elasticidade e a variação de massa pode ser obtida pelas equações 4.1 a 4.2 para os materiais A, B e C respetivamente.

$$\text{Material A} \quad E = -13604 \times \Delta_m + 2428 ; r^2 = 0,987 \quad (4.1)$$

$$\text{Material B} \quad E = -26684 \times \Delta_m + 5328; r^2 = 0,995 \quad (4.2)$$

$$\text{Material C} \quad E = -24224 \times \Delta_m + 6362; r^2 = 0,991 \quad (4.3)$$

Em que:

E [MPa] – Módulo de elasticidade

Δ_m [%] – Variação de massa

r^2 – Coeficiente de correlação

A existência desta relação poderá tornar possível o estabelecimento de modelos de comportamento mecânico a longo prazo deste tipo de materiais atendendo ao seu teor de água (função das condições de exposição).

4.3 Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido a ambiente húmido

A comparação entre os três provetes ao nível do inchamento em espessura, largura e comprimento pode ser observada nas Figuras 4.7 a 4.9.

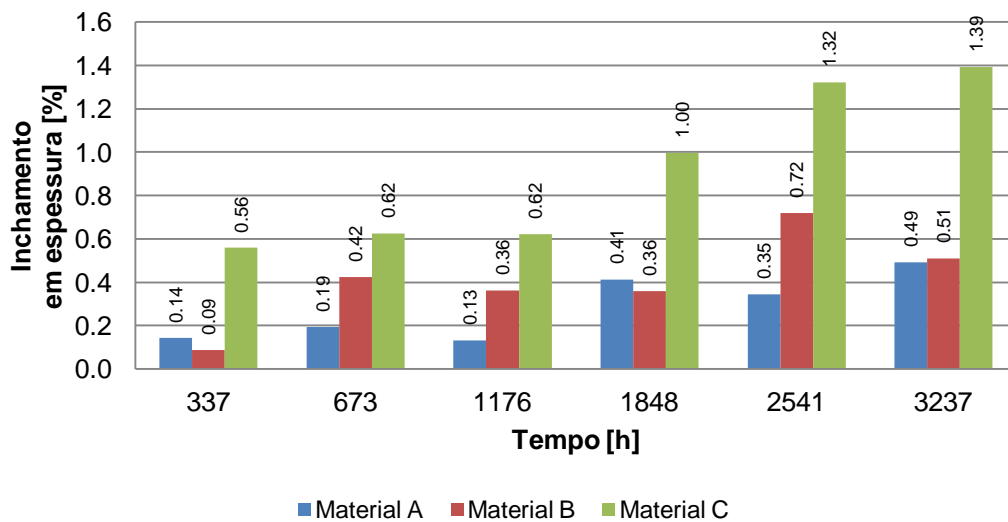


Figura 4.7 - Valores médios do inchamento em espessura dos materiais A, B e C em ambiente húmido.

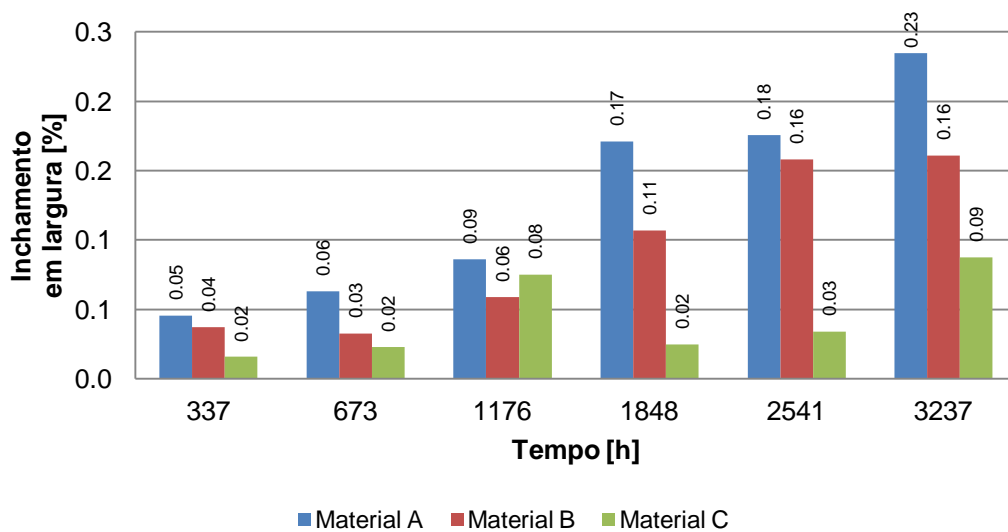


Figura 4.8 - Valores médios do inchamento em largura dos materiais A, B e C em ambiente húmido.

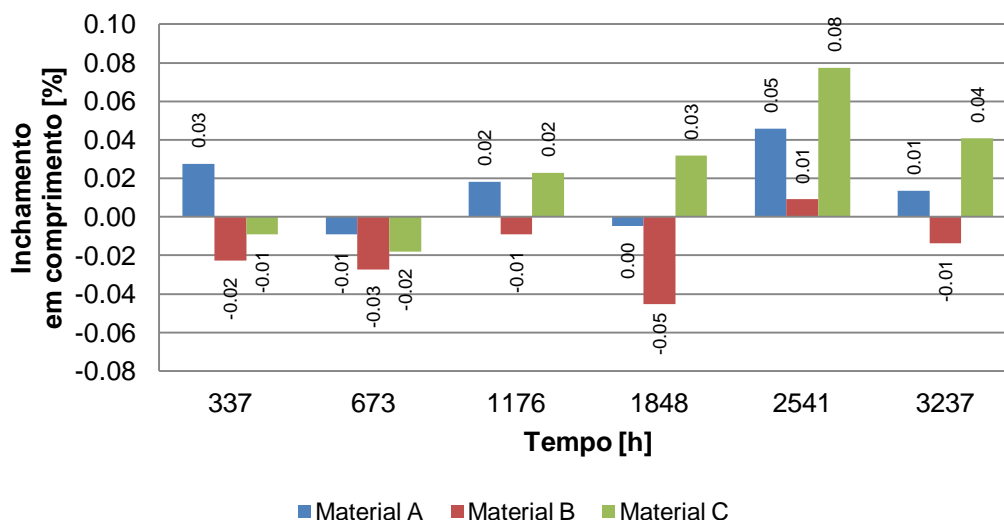


Figura 4.9 - Valores médios do inchamento em comprimento dos materiais A, B e C em ambiente húmido.

Da análise das Figuras 4.7 a 4.9 verifica-se que os provetes praticamente não sofreram variações dimensionais. Após 19 semanas de exposição (6 medições) dos provetes a um ambiente aproximadamente constante de 75% de humidade relativa, as variações ao nível do inchamento encontram-se entre 0% e 1%.

Importa referir que os valores de diminuição inchamento e inchamentos negativos são incoerentes, uma vez que, os provetes ao absorverem água não deveriam diminuir de dimensão. Este fato pode dever-se à variação de dimensão dos provetes ser muito baixa, conjugada com erros de leitura. No caso do comprimento, a medição é feita através de régua, em que a precisão de leitura é inferior à da espessura e largura.

Na Figura 4.10, apresenta-se a comparação da variação de massa em relação à medição inicial, ao longo das medições efetuadas.

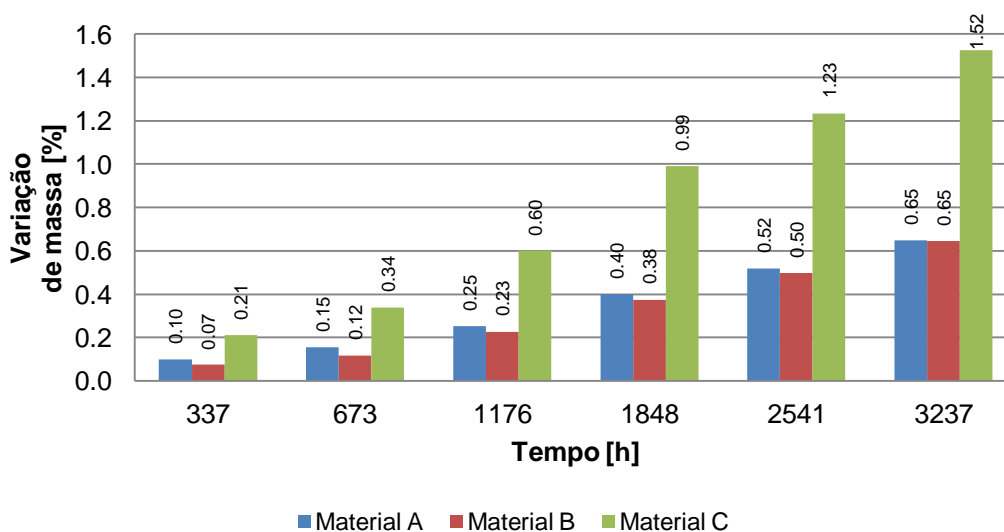


Figura 4.10 – Valores médios da variação de massa em relação à medição inicial dos materiais A, B e C em ambiente húmido.

No Anexo 3, Tabelas III.1 a III.3, encontram-se os valores individuais da variação de massa em relação à medição inicial.

Da análise da Figura 4.10 constata-se que o material C apresenta maior tendência a absorver água.

Pode verificar-se que após 19 semanas os valores de variação de massa são relativamente baixos, situando-se em 0,6% para o material A e B e em 1,5% para o material C.

Na Figura 4.11, apresenta-se a comparação entre os três provetes ao nível da variação de módulo de elasticidade em relação à medição inicial, ao longo das medições efetuadas.

No Anexo III, Tabelas III.1 a III.3, encontram-se os valores individuais da variação de módulo de elasticidade em relação à medição inicial.

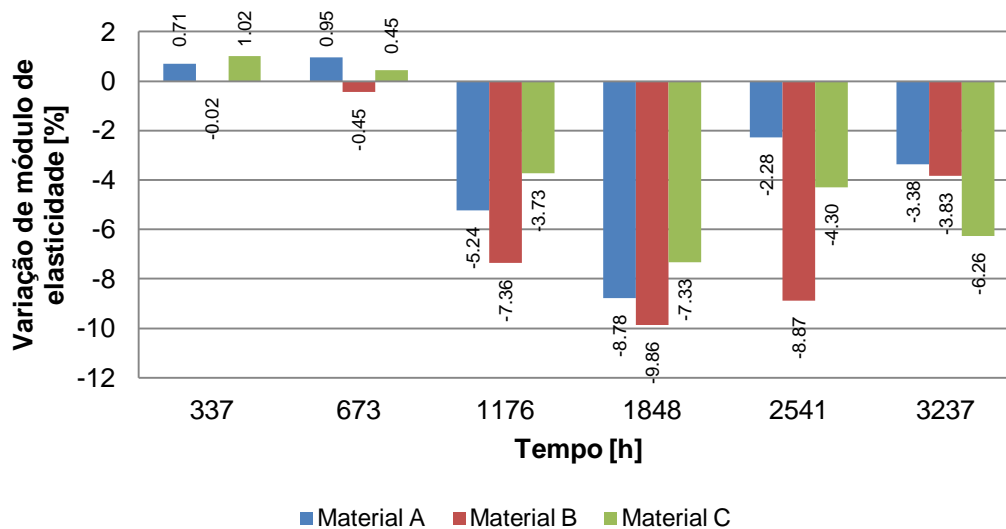


Figura 4.11 – Valores médios da variação de módulos de elasticidade em relação à medição inicial dos materiais A, B e C em ambiente húmido.

Da análise da Figura 4.11, verifica-se que as perdas de módulo de elasticidade por parte destes materiais, encontram-se abaixo dos 10%. De salientar que até após a medição 2 foi alargada a periodicidade dos ensaios, daí as diferenças de valores entre as duas primeiras medições e as restantes.

A variação positiva inicial e a oscilação de valores da variação de módulo de elasticidade entre medições 3 e 6 podem dever-se à variação de massa dos materiais ter sido bastante baixa.

4.4 Ensaio de resistência à humidade

Relativamente ao ensaio de resistência à humidade, este acaba por ser o que melhor traduz uma real aplicação exterior por parte destes materiais, pois ao longo da sua vida útil, os pavimentos encontram-se sujeitos a diversas situações de exposição ao meio ambiente.

A comparação do inchamento em espessura, largura e comprimento para o ensaio de resistência à humidade entre os três provetes pode ser observada nas Figuras 4.12 a 4.14.

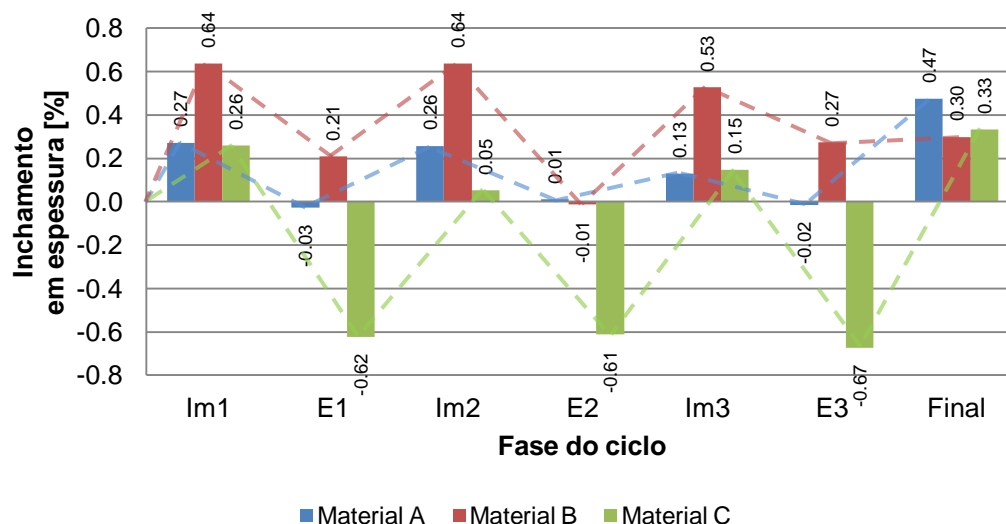


Figura 4.12 - Valores médios do inchamento em espessura dos materiais A, B e C no ensaio de resistência à humidade.

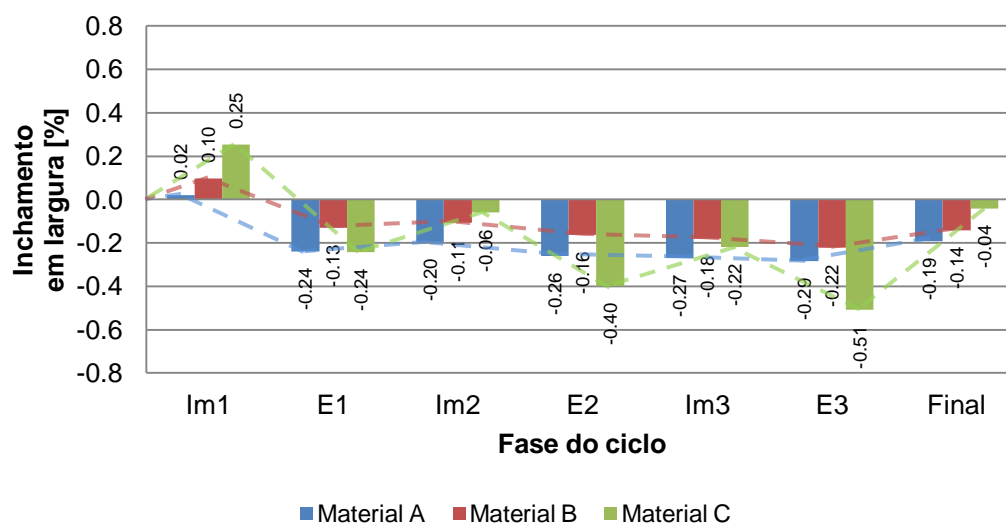


Figura 4.13 - Valores médios do inchamento em largura dos materiais A, B e C no ensaio de resistência à humidade.

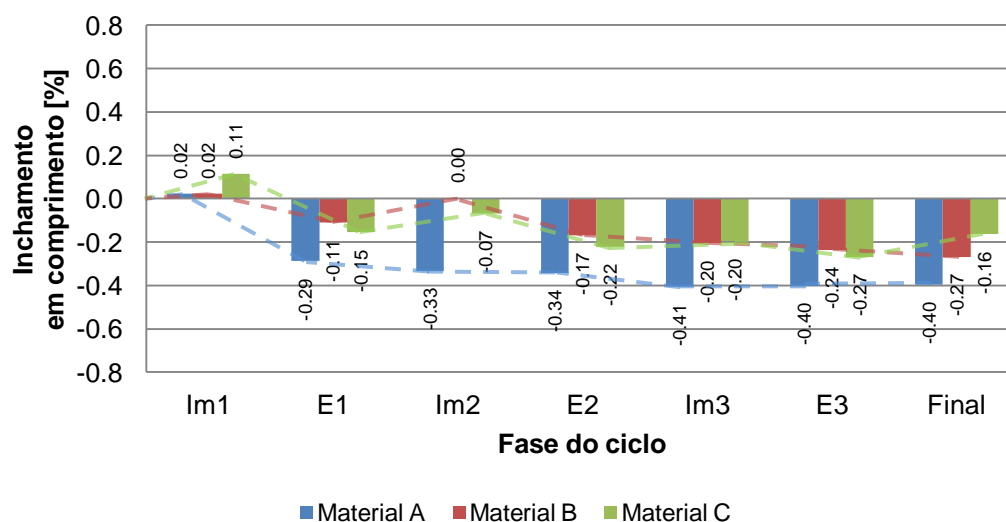


Figura 4.14 - Valores médios do inchamento em comprimento dos materiais A, B e C no ensaio de resistência à humidade.

Da análise das Figuras 4.12 a 4.14 verifica-se, à exceção do inchamento em espessura, que estes materiais após o primeiro ciclo mantiveram sempre um inchamento negativo, apesar do tempo de imersão ser maior que o tempo de secagem, dando a entender que estes materiais para as condições do ensaio tiveram maior facilidade em secar do que em absorver água.

Na Figura 4.15, apresenta-se a comparação da variação de massa em relação à medição inicial, ao longo das medições efetuadas.

No Anexo 4, Tabelas IV.1 a IV.3, encontram-se os valores individuais da variação de massa em relação à medição inicial.

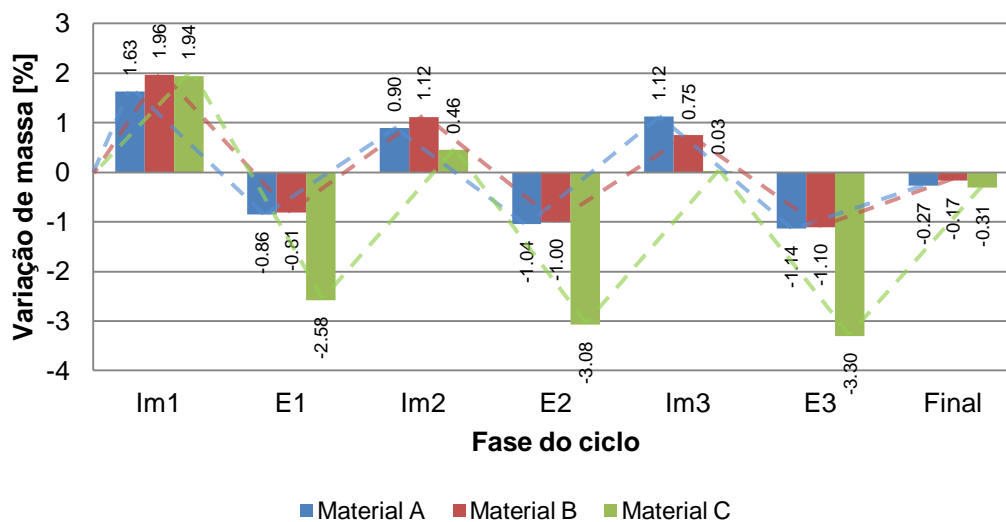


Figura 4.15 – Valores médios da variação de massa em relação à medição inicial dos materiais A, B e C no ensaio de resistência à humidade.

Da análise da Figura 4.15 constata-se que os provetes no segundo ciclo apresentam valores muito próximos do terceiro ciclo, dando a entender uma possível estabilização logo no segundo ciclo.

Na Figura 4.16, apresenta-se a comparação da variação de módulo de elasticidade em relação à medição inicial, ao longo das medições efetuadas.

No Anexo 4, Tabelas IV.1 a IV.3, encontram-se os valores individuais da variação de módulo de elasticidade em relação à medição inicial.

Da análise da Figura 4.16, a percentagem de perda de módulo de elasticidade, realizados três ciclos, situa-se entre os 22% e os 29%, sendo que após o período de estabilização (final), apresentam uma recuperação de cerca de 10% de módulo de elasticidade, situando-se a perda de módulo de elasticidade entre os 11% e os 15%.

Após a realização de cada ciclo, o material A possuiu sempre maiores perdas, seguido do material B e C respetivamente.

Apesar de se verificarem as maiores perdas no terceiro ciclo, é possível observar que são próximas das do segundo, dando a entender uma possível estabilização das perdas de módulo de elasticidade ao fim de dois ciclos, assim como tinha sido observado relativamente à absorção de água.

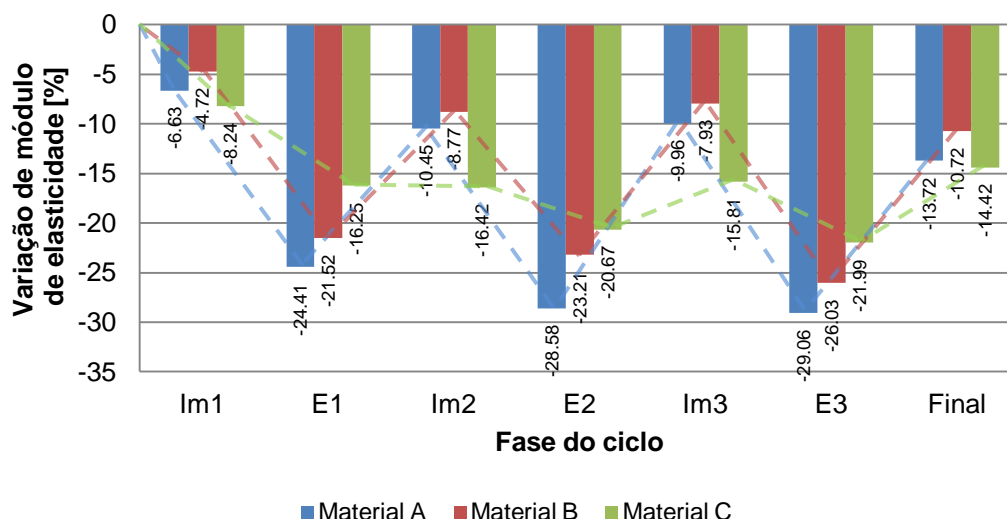


Figura 4.16 - Variação dos valores médios dos módulos de elasticidade de cada material em relação à fase inicial no ensaio de resistência à humidade.

4.5 Análise global e comparação com outros trabalhos de investigação

Nesta secção são comparados os resultados obtidos com os de outros autores (referidos na secção 2.5). Esta análise foi realizada, tendo em conta a existência de algumas diferenças nos parâmetros dos diferentes estudos, nomeadamente a composição dos WPC, os procedimentos de ensaio e os ensaios terem sido realizados por técnicos diferentes.

Nas Figuras 4.17 a 4.19, os resultados obtidos por outros autores apresentam-se a cor cinza e os resultados obtidos na presente dissertação apresentam-se a cor verde.

A comparação inicia-se pela perda de módulo de elasticidade dos materiais expostos ao ensaio de resistência à humidade, seguida da absorção de água e da perda de módulo de elasticidade do ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido à imersão em água.

4.5.1 Perda de módulo de elasticidade dos materiais expostos ao ensaio de resistência à humidade

Na Figura 4.17 são comparados os resultados obtidos da perda de módulo de elasticidade dos materiais no ensaio de resistência à humidade, com os de outros autores [17].

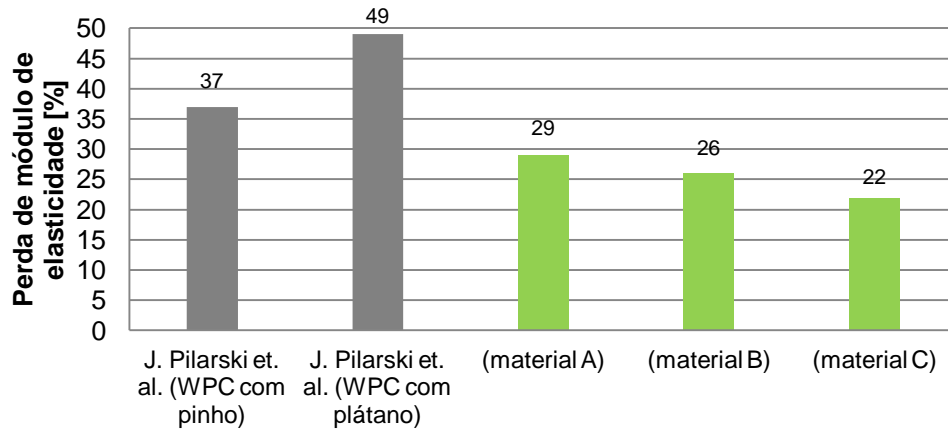


Figura 4.17 – Percentagem de perda de módulo de elasticidade dos materiais sujeitos ao ensaio de resistência à humidade.

Da Figura 4.17 observa-se que os valores obtidos neste ensaio são inferiores aos dos outros autores [17], podendo esta disparidade dever-se sobretudo à diferença nos métodos de ensaio, nomeadamente ao tempo da fase de imersão em água (70h no presente estudo e após a estabilização do peso em [17]), tal como já foi anteriormente observado, ocorrendo maiores perdas devido à imersão prolongada em água. Outras componentes do método de ensaio diferentes nestes dois estudos foi o número de ciclos realizados, uma vez que no presente trabalho apenas foram realizados 3 ciclos ao invés de 15 ciclos apresentados pelo estudo de comparação [17] e a duração e temperatura das fases de secagem (70h a 70 °C do presente trabalho em vez de 24h a 23 °C no estudo realizado por J. Pilarski et al. [17]). Estes factos contribuem para as diferenças obtidas. A composição dos diversos WPC desempenha também um papel nas diferenças das perdas, verificado entre os dois casos no estudo de Pilarski et al. [17].

4.5.2 Absorção de água dos materiais expostos a imersão em água

Na Figura 4.18 são comparados os resultados obtidos na absorção de água dos materiais no ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido à imersão em água, com os de outros autores [21].

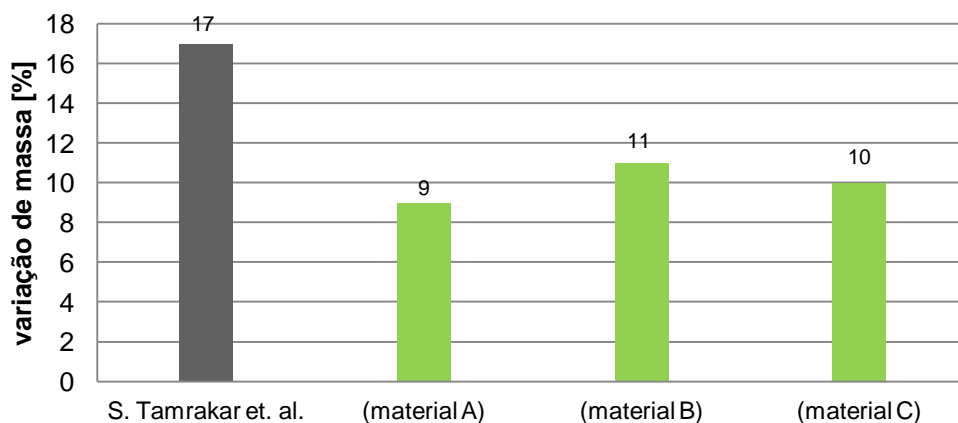


Figura 4.18 – Percentagem de variação de massa dos materiais sujeitos à imersão em água.

Da Figura 4.18 observa-se que os valores obtidos ao nível da absorção de água dos materiais no ensaio de imersão apresentam valores ligeiramente mais baixos, podendo ser a causa a diferença do tempo de imersão, sendo esta superior nos ensaios realizados por outros autores [21] (5016h comparativamente às 3692h do presente estudo).

4.5.3 Perda de módulo de elasticidade dos materiais expostos a imersão em água

Na Figura 4.19 são comparados os resultados obtidos ao nível da perda de módulo de elasticidade dos materiais imersos em água, com os de outros autores [21].

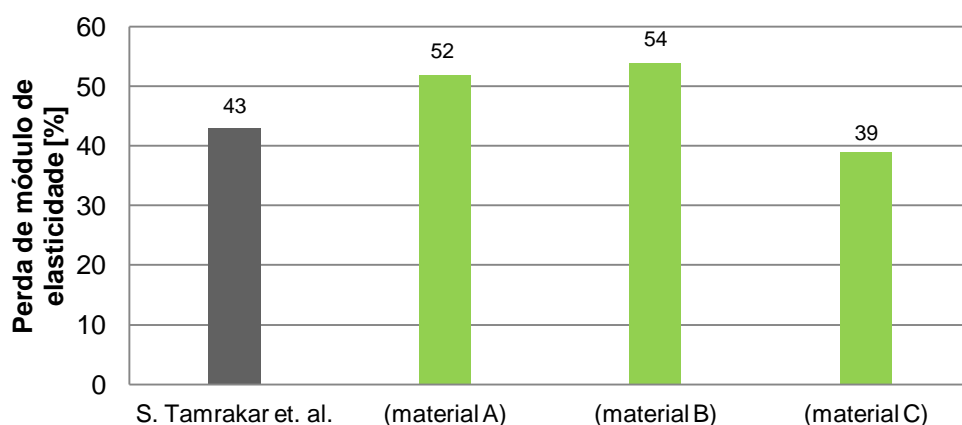


Figura 4.19 – Percentagem de perda módulo de elasticidade dos materiais sujeitos à imersão em água.

Da Figura 4.19 observa-se que ao nível das perda de módulo de elasticidade dos materiais imersos em água apresentam valores diferentes, situando-se os materiais A e B acima e o material C abaixo dos valores obtidos por outros autores [21]. Como referido anteriormente, o material C representa uma “gama” de materiais muito boa, logo como seria de esperar as suas perdas são inferiores.

Em suma, com o enquadramento dos resultados obtidos pelos autores [17, 21] referidos e o da presente dissertação, verifica-se que os resultados encontram-se dentro da mesma ordem de grandeza, tendo em consideração todas as condicionantes que dificultam uma comparação direta dos resultados, principalmente, devido à diferença entre aos procedimentos de ensaios utilizados, nomeadamente, o número de ciclos utilizados no ensaio de resistência à humidade, a temperatura e duração das fases de secagem, assim como a diferença de duração dos ensaios de imersão em água e as diferentes composições dos WPC.

VERIFICAÇÃO AOS ESTADOS LIMITE DE SERVIÇO

5.1 Considerações iniciais

No presente capítulo são referidas as condições assumidas e os resultados obtidos na verificação aos Estados Limite de Serviço (ELS), tendo como base as Normas e fórmulas enunciadas na seção 2.6.4.

5.2 Condições assumidas na verificação

De forma a verificar se as perdas de módulo de elasticidade dos ensaios realizados repercutiam algum efeito ao nível de uma aplicação real, foram avaliados os Estados Limite de Serviço, através da verificação da deformação segundo o EC 5 (2004) [3].

Para a verificação consideraram-se dois casos/tipos distintos de aplicação: em passadiço e em cobertura acessível, tendo sido escolhidos pois representam uma possível aplicação prática dos ensaios realizados no presente trabalho.

Foi efetuado recurso ao EC 5 (2004) [3] para a determinação da deformação final (expressão 2.4) e dos limites impostos (expressão 2.8), às Tabelas Técnicas [19] para o cálculo da deformação instantânea (expressão 2.3) e ao Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (1983) [18] de forma a identificar os valores das sobrecargas e respetivos Ψ_2 .

Na tabela 5.1 apresentam-se os valores das sobrecargas e respetivos Ψ_2 para os dois casos de aplicação.

Tabela 5.1 - Valores de sobrecarga e Ψ_2 .

Aplicação	Sobrecarga [kN/m ²]	Ψ_2
Passadiço	4	0,2
Cobertura acessível	2	0

De referir ainda que os vão máximos utilizados na aplicação de WPC rondam os 450 mm, tendo sido efetuadas as seguintes verificações para vãos entre 350 mm e 450 mm. O fator de deformação k_{def} utilizado foi de 27,5 [22].

5.3 Resultados

Na tabela 5.2 apresentam-se as percentagens de perda de módulo de elasticidade que deixam de permitir cumprir os ELS exigidos pelo regulamento para os casos de aplicação escolhidos e respetivos vãos.

Tabela 5.2 – Percentagens máximas de perda de módulo de elasticidade a partir do qual não se cumpre os ELS estabelecido face à utilização e ao vão.

Aplicação	Comprimento do vão (L) em mm	Perdas de módulo de elasticidade [%]		
		Material A	Material B	Material C
Passadiço	350	0	27	50
	400	0	0	15
	450	0	0	0
Cobertura acessível	400	74	84	89
	450	61	75	83

Nas Figuras 5.1 a 5.3 apresentam-se, para os casos de aplicação definidos, a comparação entre a perda de módulo de elasticidade que deixa de verificar os ELS (a preto) e os valores obtidos nos ensaios realizados para os materiais A, B e C.

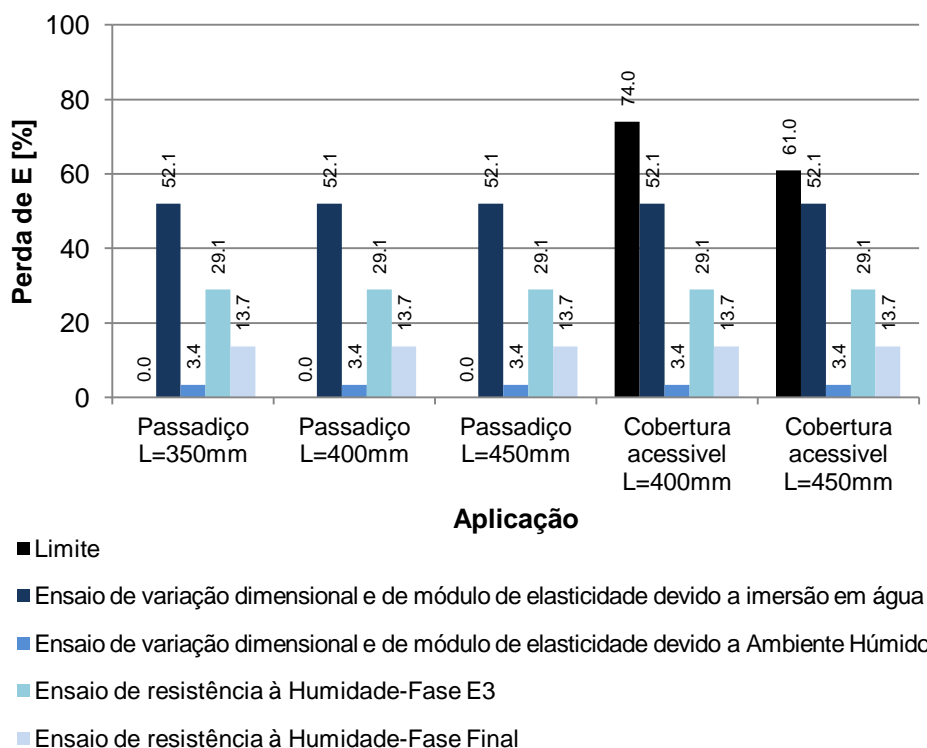
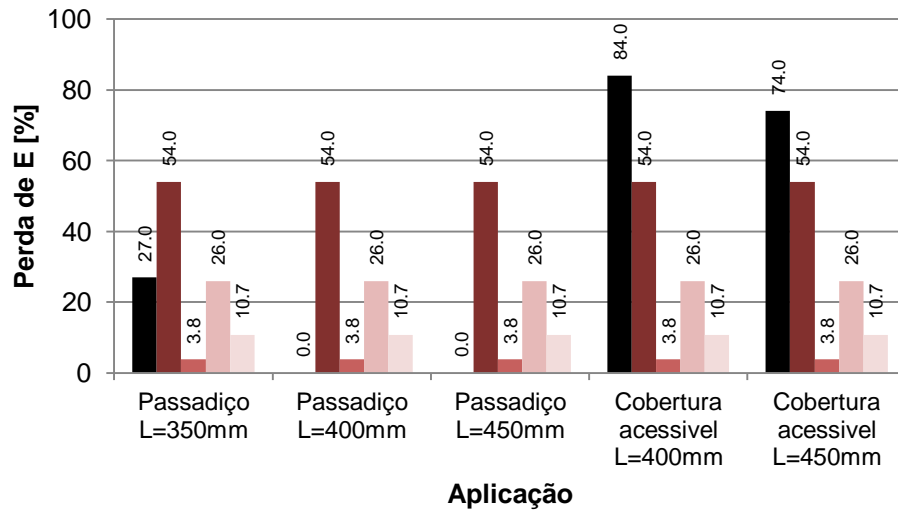
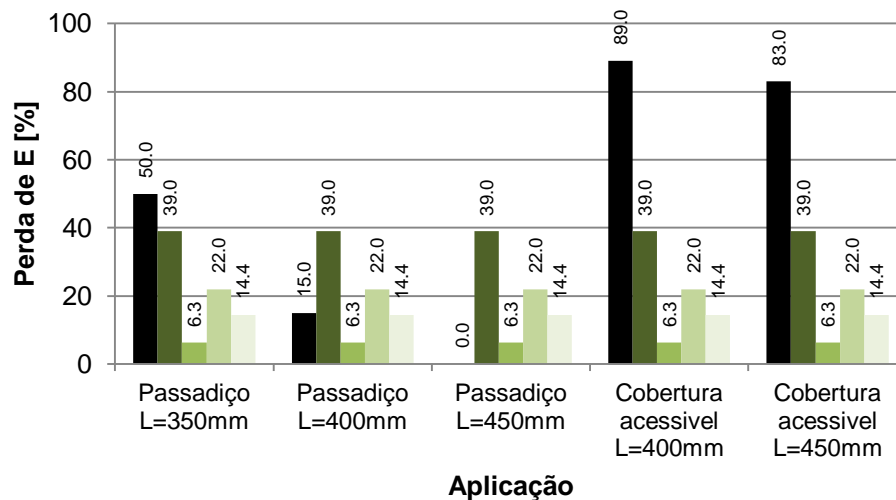


Figura 5.1 – Limite das perdas de módulo de elasticidade para o material A.



- Limite
- Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido a imersão em água
- Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido a Ambiente Húmido
- Ensaio de resistência à Humidade-Fase E3
- Ensaio de resistência à Humidade-Fase Final

Figura 5.2 – Limite das perdas de módulo de elasticidade para o material B.



- Limite
- Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido a imersão em água
- Ensaio de variação dimensional e de módulo de elasticidade devido a Ambiente Húmido
- Ensaio de resistência à Humidade-Fase E3
- Ensaio de resistência à Humidade-Fase Final

Figura 5.3 – Limite das perdas de módulo de elasticidade para o material C.

Nas figuras 5.1 a 5.3 é possível observar que, os ELS não são verificados para alguns casos de aplicações em passadiços. Quando aplicados em cobertura acessível a verificação é positiva por parte de todos os materiais.

De salientar que o material A quando aplicado em passadiço, independentemente do vão adotado e com perdas de 0% de módulo de elasticidade, não verifica os ELS. Esta questão deve-se em grande parte pelo RSA pressupor a utilização de ciclistas ou motociclistas (daí a sobrecarga de 4 kN/m^2), enquanto que os “deck’s” preveem somente o uso por parte de peões (com um valor de sobrecarga mais próximo dos 2 kN/m^2).

Com o material B, os ELS nunca são verificados em passadiços com vãos superiores a 400 mm. Para um vão de 350 mm, apenas as perdas do ensaio de imersão em água não são verificadas.

Com o material C, em passadiços com vão de 450 mm, os ELS nunca são verificados. Numa aplicação em passadiços de vão igual a 400mm apenas as perdas do ensaio de imersão e da fase de estufa do terceiro ciclo não são verificadas. Para vãos de 350 mm a verificação é sempre positiva.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Conclusões

A presente dissertação teve como objetivo, a avaliação do efeito da humidade no comportamento mecânico de régua de compósito madeira-plástico (WPC).

Alguns dos resultados obtidos foram comparados com outros estudos precedentes, de forma a relacionar o nível de absorção de água e a perda de módulo de elasticidade por parte destes materiais.

Relativamente aos ensaios realizados, o ensaio de imersão mostrou-se ser o mais gravoso ao nível de perdas, apesar de numa aplicação real ser bastante difícil atingir este nível de humidade durante tanto tempo.

O ensaio em ambiente húmido revelou que estes materiais apresentam variações dimensionais mínimas, assim como baixos níveis de absorção de água e de perdas de módulo de elasticidade quando expostos a humidade entre os 70% e 80%.

Quanto aos valores obtidos a para o inchamento das peças, verifica-se que estes materiais sofrem poucas variações dimensionais, inchando mais em espessura, seguido da largura e do comprimento.

Na absorção de água, como seria espetável, é absorvida muito menos quantidade de água comparativamente a materiais de madeira maciça, encontrando-se esta variação de massa em cerca de 10%, quando os provetes de WPC são totalmente imersos em água durante longos períodos.

A nível das perdas de módulo de elasticidade, recorrente apenas da exposição a níveis elevados de humidade, verificaram-se valores gravosos, nomeadamente quando os provetes são expostos a condições de contacto direto com água, perdendo cerca de metade do seu módulo de elasticidade. Pavimentos exteriores aplicados a descoberto, simulados pelo ensaio de resistência à humidade, apresentam perdas de módulo de elasticidade final de cerca de 10% a 15%, atingindo os 25% na fase de estufa do terceiro ciclo.

Verificou-se também, como seria expectável, que o material A, representante de uma qualidade inferior (tipo “marca branca”), para além de possuir valores de módulo de elasticidade iniciais bastante inferiores aos restantes, apresenta o mesmo nível ou níveis superiores de perdas de módulo de elasticidade. Tendo em consideração que os valores de módulo de elasticidade para este material são bastante inferiores, apresentar perdas de cerca de metade, pode constituir sérios problemas em aplicações em pavimentos, sobretudo com exposição elevada a

condições climatéricas adversas, como pode ser comprovado através da verificação aos Estados Limite de Serviço.

Relativamente à verificação aos Estados Limite de Serviço, os resultados obtidos mostram-se bastante gravosos, havendo a necessidade de efetuar um estudo por parte das empresas, de forma a estudar as implicações dos níveis de absorção de água verificada em serviço e do real fator de deformação no desempenho do seu produto. O material A nunca obtém uma verificação positiva numa aplicação em passadiço, utilizando as sobrecargas preconizadas pelo RSA.

Assim, e de uma forma geral, verifica-se que existem dois casos de exposição à humidade por parte destes materiais, que se revelam bastante gravosos a nível de perdas de módulo de elasticidade: ensaio de imersão em água e ensaio de resistência à humidade.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Como desenvolvimentos deste trabalho e de forma a dar continuidade ao estudo e aprofundar alguns aspetos relacionados com a influência da humidade neste tipo de materiais propõe-se:

- Avaliar o efeito da humidade no comportamento mecânico de réguas de compósito madeira-plástico com perfil cheio;
- Avaliar o efeito da humidade no comportamento mecânico de réguas de compósito utilizando as alterações efetuadas à norma EN 321 [15] por parte da norma EN 15534-1:2014(E) [1] recentemente publicada;
- O estudo do comportamento à fluência dos WPC.

Referências Bibliográficas

- [1] EN 15534-1 (2014): *Composites made from cellulose-based materials and thermoplastics (usually called wood-polymer composites (WPC) or natural fibre composites (NFC)). Test methods for characterisation of compounds and products*. CEN, 2014.
- [2] Defoirdt, N., Gardin, S., Van den Bulcke, J., & Van Acker, J.: *Moisture dynamics of WPC and the impact on fungal testing*. International Biodeterioration & Biodegradation, Vol. 64(1):pp. 65–72, doi:10.1016/j.ibiod.2009.07.010, 2010.
- [3] EN 1995-1:2004, *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*. CEN, 2004.
- [4] Fabiyi, J. S., & McDonald, A. G.: Effect of wood species on property and weathering performance of wood plastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41(10):pp. 1434–1440. doi:10.1016/j.compositesa.2010.06.004, 2010.
- [5] Fabiyi, J. S., McDonald, A. G., Wolcott, M. P., & Griffiths, P. R.: *Wood plastic composites weathering: Visual appearance and chemical changes*. Polymer Degradation and Stability, Vol. 93(8):pp. 1405–1414, doi:10.1016/j.polymdegradstab.2008.05.024, 2008.
- [6] Haftkhani, A. R., Ebrahimi, G., Tajvidi, M., Layeghi, M., & Arabi, M.: *Lateral resistance of joints made with various screws in commercial wood plastic composites*. Materials & Design, Vol. 32(7):pp. 4062–4068. doi:10.1016/j.matdes.2011.03.020, 2011.
- [7] Hosseinaei, O., Wang, S., Taylor, A. M., & Kim, J.-W.: *Effect of hemicellulose extraction on water absorption and mold susceptibility of wood-plastic composites*. International Biodeterioration & Biodegradation, Vol. 71:pp. 29–35, doi:10.1016/j.ibiod.2011.12.015, 2012.
- [8] Jiang, H. and D.P. Kamdem: *Development of Poly(vinyl chloride)/Wood Composites. A Literature Review*. Journal of Vinyl & Additive Technology, Vol. 10(2):pp. 59-69, 2004.
- [9] Kiguchi, M., Kataoka, Y., Matsunaga, H., Yamamoto, K., & Evans, P. D.: *Surface deterioration of wood-flour polypropylene composites by weathering trials*. Journal of Wood Science, Vol. 53(3):pp. 234–238, doi:10.1007/s10086-006-0838-8, 2006.

- [10] Klyosov, A.: *WOOD-PLASTIC COMPOSITES*. (Wiley, Ed.) (pp. 100–120), 2007.
- [11] Lampo R, Nosker T, Barno D, Busel J, Maher A, Dutta P, Odello R.: *Development and demonstration of FRP composite fender, loadbearing and sheet piling systems*. US Army Corps of Engineers, Construction Engineering Research Laboratories, USACERL Technical Report 98/123, 1998.
- [12] Leu, S.-Y., Yang, T.-H., Lo, S.-F., & Yang, T.-H.: *Optimized material composition to improve the physical and mechanical properties of extruded wood–plastic composites (WPCs)*. *Construction and Building Materials*, Vol. 29:pp. 120–127, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.09.013, 2012.
- [13] NP EN 310 (2002): *Placas de derivados de madeira. Determinação do módulo de elasticidade em flexão e da resistência a flexão*. IPQ, 2002.
- [14] NP EN 317 (2002): *Aglomerado de partículas de madeira e aglomerado de fibras de madeira. Determinação do inchamento em espessura após imersão em água*. IPQ, 2002.
- [15] NP EN 321 (2010): *Placas de derivados de madeira. Determinação da resistência à humidade através de ensaios cíclicos*. IPQ, 2010.
- [16] NP EN 325 (2013): *Placas de derivados de madeira. Determinação das dimensões dos provetes*. IPQ, 2013.
- [17] Pilarski, J. M., & Matuana, L. M.: *Durability of wood flour-plastic composites exposed to accelerated freeze–thaw cycling. II. High density polyethylene matrix*. *Journal of Applied Polymer Science*, Vol. 100(1):pp. 35–39, doi:10.1002/app.22877, 2006.
- [18] Regulamento de Segurança e Ações para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA) – Decreto-lei nº 235/83 de 3 de Maio.
- [19] Reis, A. C., Farinha, N. B., Farinha, J. P. B.: *Tabelas técnicas*. (E. Técnicas E.T. L., Ed.) (pp. 342), 2010.
- [20] Rostampour Haftkhani, A., Ebrahimi, G., Tajvidi, M., & Layeghi, M.: *Investigation on withdrawal resistance of various screws in face and edge of wood–plastic composite panel*. *Materials & Design*, Vol. 32(7):pp. 4100–4106. doi:10.1016/j.matdes.2011.02.065, 2011.

- [21] Tamrakar, S., & Lopez-Anido, R. A.: *Water absorption of wood polypropylene composite sheet piles and its influence on mechanical properties*. Construction and Building Materials, Vol. 25(10):pp. 3977–3988, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.04.031, 2011.
- [22] VTT Expert Services Oy. 2011. European Technical Approval – 11/0077. UPM ProFi™ Deck terrace decking kit.
- [23] Wechsler, A., & Hiziroglu, S.: *Some of the properties of wood–plastic composites*. Building and Environment, Vol. 42(7):pp. 2637–2644. doi:10.1016/j.buildenv.2006.06.018, 2007.
- [24] WRAP, *WOOD PLASTIC COMPOSITES STUDY - TECHNOLOGIES AND UK MARKET OPPORTUNITIES*, T.W.a.R.A. Programme, Editor. 2003: Oxon.

Webgrafia

- [25] <http://architecturedream.com/14295/composite-wood-flooring/composite-wood-flooring-wood-plastic-composite-hollow-planking-wpc-composite-flooring-decking-ce-rohs-european-reach/> (consultado em 10-06-2014)
- [26] <http://7trustchina.com/wpc-knowledge/seven-trust-wpc-composite-decking-prices-ireland-agent-suppliers.html> (consultado em 10-06-2014)
- [27] <http://www.tecnodeck.pt/nl/galeria/41/> (consultado em 10-06-2014)

Anexo 1

RESULTADOS DA ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO MÉDIO (ATR-FTIR)

De seguida são apresentados os resultados obtidos na análise da composição das régua em estudo, efetuada pelo Grupo de Florestas e Produtos Florestais do Instituto de Investigação Científica Tropical, no âmbito do projeto P2I coordenado pelo LNEC intitulado “efeito da humidade no desempenho em serviço de compósitos de madeira plástico”.

Os espectros de ATR-FTIR mostram que as amostras se separam em 3 grupos diferentes: o grupo A, constituído pelas amostras A1 e A2, o grupo constituído C pelas amostras CC e CE e pela amostra B que embora tenha algumas semelhanças com o grupo A é muito diferente deste.

As principais diferenças entre o grupo A e o grupo C residem na proporção relativa de madeira polímero e no tipo de polímero.

Os espectros do grupo A são dominados pelo espectro do polímero que é muito semelhante ao espectro do polietileno (alongamento simétrico e assimétrico dos grupos CH_2 a 2916 e 2849 cm^{-1} respetivamente, a banda de deformação CH com máximo a 1470 cm^{-1} bem como a bandas de deformação fora do plano com máximo a 717 cm^{-1}).

A amostra B tem a proporção mais elevada de polímero e o seu espectro tem as mesmas bandas do polietileno, nomeadamente as bandas correspondentes ao alongamento simétrico e assimétrico dos grupos CH_2 a 2916 e 2849 cm^{-1} respetivamente, as bandas de deformação CH com máximos a 1470 cm^{-1} bem como as bandas fora do plano com máximo a 717 cm^{-1} . No entanto o espectro da amostra B apresenta 3 bandas muito intensas com máximos a 1015 a 464 e a 450 cm^{-1} que não podem ser atribuídas nem à madeira nem ao polietileno e cuja origem de momento não é possível determinar Figura I.1.

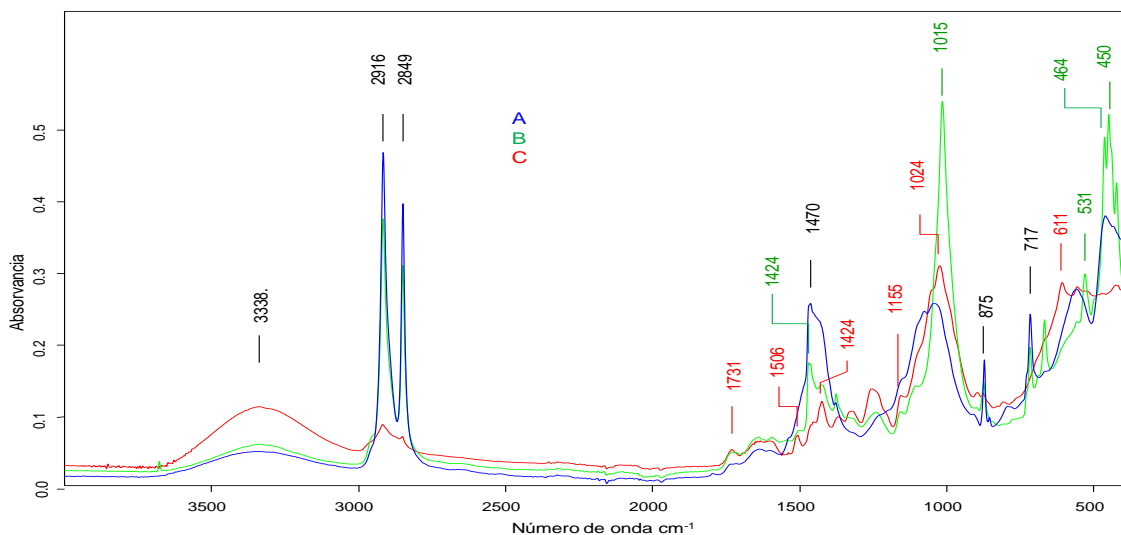


Figura I.1. Espectros de ATR-FTIR entre 4000 e 400 cm^{-1} das amostras A, B e C.

Os espectros do grupo C são dominados pelo espectro da madeira (banda alongamento CO características das pentosanas a 1731 cm^{-1} , banda característica da lenhina (CH aromático) a 1506 cm^{-1} , e as bandas características da celulose com máximos a 1024 e 1155 cm^{-1}). O

espectro do polímero é semelhante ao espectro do policloreto de vinil (PVC) nomeadamente a bandas de deformação CH com máximo a 1424 cm^{-1} e a banda característica do alongamento CCl a 611 cm^{-1} .

O grupo A tem mais polímero do que os espectros das amostras A1 e A2, sendo estas muito semelhantes ao espectro do polietileno. O grupo A é basicamente polímero e o grupo C é basicamente madeira.

Anexo 2

RESULTADOS INDIVIDUAIS DO ENSAIO DE IMERSÃO EM ÁGUA

Tabela I.1 – Resultados individuais do material A no ensaio de imersão em água

Provete	Medição	Tempo [h]	Massa [g]	E [Mpa]	Variação massa [%]	Variação de E [%]
A1	Inicial	0	1372.5	2219.1	-	-
	m1	337	1410.4	1997.8	2.8	-10.0
	m2	673	1431.8	1810.3	4.3	-18.4
	m3	1008	1443.5	1758.5	5.2	-20.8
	m4	1344	1450.3	1562.2	5.7	-29.6
	m5	1679	1459.8	1494.7	6.4	-32.6
	m6	1991	1471.4	1355.0	7.2	-38.9
	m7	2350	1478.2	1260.1	7.7	-43.2
	m8	2683	1481.2	1173.2	7.9	-47.1
	m9	3021	1493.1	978.8	8.8	-55.9
	m10	3354	1503.0	1031.6	9.5	-53.5
A2	Inicial	0	1507.4	2546.5	-	-
	m1	337	1527.8	2344.3	1.4	-7.9
	m2	673	1537.7	2465.1	2.0	-3.2
	m3	1008	1543.3	2431.4	2.4	-4.5
	m4	1344	1548.7	2161.8	2.7	-15.1
	m5	1679	1550.9	2130.9	2.9	-16.3
	m6	1991	1556.1	2081.1	3.2	-18.3
	m7	2350	1561.8	2043.4	3.6	-19.8
	m8	2683	1561.7	2118.2	3.6	-16.8
	m9	3021	1565.2	2102.4	3.8	-17.4
	m10	3354	1567.1	1973.0	4.0	-22.5
A3	Inicial	0	1360.4	2209.7	-	-
	m1	337	1395.5	2040.1	2.6	-7.7
	m2	673	1413.3	1816.3	3.9	-17.8
	m3	1008	1422.5	1787.9	4.6	-19.1
	m4	1344	1431.3	1620.3	5.2	-26.7
	m5	1679	1439.1	1552.6	5.8	-29.7
	m6	1991	1448.4	1440.6	6.5	-34.8
	m7	2350	1457.1	1372.3	7.1	-37.9
	m8	2683	1464.0	1282.7	7.6	-41.9
	m9	3021	1473.1	1106.9	8.3	-49.9
	m10	3354	1478.0	1143.0	8.6	-48.3
A4	Inicial	0	1336.7	2160.1	-	-
	m1	337	1375.6	1960.8	2.9	-9.2
	m2	673	1396.3	1779.1	4.5	-17.6
	m3	1008	1409.9	1747.7	5.5	-19.1
	m4	1344	1418.8	1542.0	6.1	-28.6
	m5	1679	1427.6	1400.6	6.8	-35.2
	m6	1991	1435.7	1261.8	7.4	-41.6
	m7	2350	1448.0	1184.5	8.3	-45.2
	m8	2683	1456.2	1111.2	8.9	-48.6
	m9	3021	1465.6	911.9	9.7	-57.8
	m10	3354	1471.2	973.5	10.1	-54.9
A5	Inicial	0	1361.0	2196.1	-	-
	m1	337	1394.7	1992.5	2.5	-9.3
	m2	673	1413.4	1859.3	3.9	-15.3
	m3	1008	1425.7	1823.5	4.8	-17.0
	m4	1344	1432.1	1631.3	5.2	-25.7
	m5	1679	1443.8	1548.1	6.1	-29.5
	m6	1991	1448.4	1405.0	6.4	-36.0
	m7	2350	1458.5	1314.9	7.2	-40.1
	m8	2683	1464.5	1239.0	7.6	-43.6
	m9	3021	1477.2	1073.2	8.5	-51.1
	m10	3354	1478.3	1086.9	8.6	-50.5
	m11	3692	1476.6	1017.7	8.5	-53.7

Tabela I.1 – Resultados individuais do material A no ensaio de imersão em água (continuação)

Provete	Medição	Tempo [h]	Massa [g]	E [Mpa]	Variação massa [%]	Variação de E [%]
A6	Inicial	0	1380.4	2263.3	-	-
	m1	337	1415.8	1960.3	2.6	-13.4
	m2	673	1437.1	1827.5	4.1	-19.3
	m3	1008	1443.9	1772.7	4.6	-21.7
	m4	1344	1454.9	1560.1	5.4	-31.1
	m5	1679	1465.6	1423.6	6.2	-37.1
	m6	1991	1474.1	1284.7	6.8	-43.2
	m7	2350	1485.1	1159.0	7.6	-48.8
	m8	2683	1499.0	1113.6	8.6	-50.8
	m9	3021	1510.2	894.8	9.4	-60.5
	m10	3354	1510.1	941.6	9.4	-58.4
A7	Inicial	0	1344.6	2188.9	-	-
	m1	337	1376.2	1982.5	2.4	-9.4
	m2	673	1393.9	1872.3	3.7	-14.5
	m3	1008	1404.5	1819.4	4.5	-16.9
	m4	1344	1414.9	1677.8	5.2	-23.3
	m5	1679	1420.7	1565.5	5.7	-28.5
	m6	1991	1427.4	1498.3	6.2	-31.6
	m7	2350	1436.2	1394.0	6.8	-36.3
	m8	2683	1439.9	1357.4	7.1	-38.0
	m9	3021	1452.0	1165.0	8.0	-46.8
	m10	3354	1452.5	1189.1	8.0	-45.7
A8	Inicial	0	1479.6	2985.1	-	-
	m1	337	1549.4	2447.7	4.7	-18.0
	m2	673	1593.4	2323.8	7.7	-22.2
	m3	1008	1609.0	2070.2	8.7	-30.6
	m4	1344	1656.6	1615.0	12.0	-45.9
	m5	1679	1580.8	1395.5	6.8	-53.3
	m6	1991	1697.3	1180.3	14.7	-60.5
	m7	2350	1708.8	1107.5	15.5	-62.9
	m8	2683	1713.1	1114.6	15.8	-62.7
	m9	3021	1723.7	997.7	16.5	-66.6
	m10	3354	1726.3	1126.1	16.7	-62.3
A9	Inicial	0	1349.0	2221.1	-	-
	m1	337	1384.2	2027.2	2.6	-8.7
	m2	673	1397.5	1908.1	3.6	-14.1
	m3	1008	1406.8	1833.3	4.3	-17.5
	m4	1344	1416.1	1671.9	5.0	-24.7
	m5	1679	1427.1	1617.5	5.8	-27.2
	m6	1991	1432.0	1516.2	6.1	-31.7
	m7	2350	1447.9	1425.7	7.3	-35.8
	m8	2683	1448.8	1382.9	7.4	-37.7
	m9	3021	1462.7	1181.9	8.4	-46.8
	m10	3354	1462.8	1201.7	8.4	-45.9
A10	Inicial	0	1344.4	2258.1	-	-
	m1	337	1380.6	1994.4	2.7	-11.7
	m2	673	1396.7	1878.7	3.9	-16.8
	m3	1008	1408.7	1817.0	4.8	-19.5
	m4	1344	1416.6	1621.2	5.4	-28.2
	m5	1679	1426.5	1536.1	6.1	-32.0
	m6	1991	1431.7	1433.4	6.5	-36.5
	m7	2350	1444.7	1340.7	7.5	-40.6
	m8	2683	1454.0	1265.9	8.2	-43.9
	m9	3021	1464.2	1078.9	8.9	-52.2
	m10	3354	1461.3	1113.1	8.7	-50.7
	m11	3692	1465.1	1004.0	9.0	-55.5

Tabela I.2 – Resultados individuais do material B no ensaio de imersão em água

Provete	Medição	Tempo [h]	Massa [g]	E [Mpa]	Variação massa [%]	Variação de E [%]
B1	Inicial	0	1418.2	5469.0	-	-
	m1	338	1473.6	4113.9	3.9	-24.8
	m2	674	1498.9	3717.0	5.7	-32.0
	m3	1009	1519.0	3380.1	7.1	-38.2
	m4	1345	1541.3	2890.6	8.7	-47.1
	m5	1680	1556.1	2551.3	9.7	-53.4
	m6	1992	1565.2	2391.8	10.4	-56.3
	m7	2351	1573.1	2267.7	10.9	-58.5
	m8	2684	1578.5	2225.1	11.3	-59.3
	m9	3022	1584.1	1932.8	11.7	-64.7
	m10	3355	1585.8	2048.0	11.8	-62.6
B2	Inicial	0	1389.7	5262.8	-	-
	m1	338	1444.5	4171.0	3.9	-20.7
	m2	674	1470.5	3875.1	5.8	-26.4
	m3	1009	1492.3	3468.7	7.4	-34.1
	m4	1345	1511.8	2909.6	8.8	-44.7
	m5	1680	1528.0	2726.8	10.0	-48.2
	m6	1992	1537.9	2589.4	10.7	-50.8
	m7	2351	1542.5	2595.0	11.0	-50.7
	m8	2684	1546.4	2608.2	11.3	-50.4
	m9	3022	1552.6	2286.3	11.7	-56.6
	m10	3355	1551.0	2389.7	11.6	-54.6
B3	Inicial	0	1371.5	5562.1	-	-
	m1	338	1417.2	4594.9	3.3	-17.4
	m2	674	1436.2	3818.0	4.7	-31.4
	m3	1009	1452.3	3969.9	5.9	-28.6
	m4	1345	1470.4	3548.7	7.2	-36.2
	m5	1680	1480.2	2970.0	7.9	-46.6
	m6	1992	1490.8	2777.5	8.7	-50.1
	m7	2351	1500.5	2594.9	9.4	-53.3
	m8	2684	1506.1	2552.9	9.8	-54.1
	m9	3022	1514.0	2465.1	10.4	-55.7
	m10	3355	1513.8	2434.5	10.4	-56.2
B4	Inicial	0	1368.6	5503.3	-	-
	m1	338	1414.5	4580.2	3.4	-16.8
	m2	674	1435.6	3939.1	4.9	-28.4
	m3	1009	1452.1	4018.9	6.1	-27.0
	m4	1345	1464.7	3604.1	7.0	-34.5
	m5	1680	1476.5	3101.2	7.9	-43.6
	m6	1992	1487.2	2958.5	8.7	-46.2
	m7	2351	1496.7	2644.3	9.4	-52.0
	m8	2684	1503.1	2606.2	9.8	-52.6
	m9	3022	1511.7	2481.7	10.5	-54.9
	m10	3355	1511.2	2497.4	10.4	-54.6
B5	Inicial	0	1333.5	4995.2	-	-
	m1	338	1370.6	4309.7	2.8	-13.7
	m2	674	1386.0	4144.4	3.9	-17.0
	m3	1009	1398.7	3991.1	4.9	-20.1
	m4	1345	1408.8	3555.7	5.6	-28.8
	m5	1680	1418.5	3462.5	6.4	-30.7
	m6	1992	1428.7	3207.7	7.1	-35.8
	m7	2351	1438.0	2981.2	7.8	-40.3
	m8	2684	1446.2	2867.5	8.5	-42.6
	m9	3022	1456.8	2522.4	9.2	-49.5
	m10	3355	1458.1	2574.8	9.3	-48.5
	m11	3693	1464.3	2453.1	9.8	-50.9

Tabela I.2 – Resultados individuais do material B no ensaio de imersão em água (continuação)

Provete	Medição	Tempo [h]	Massa [g]	E [Mpa]	Variação massa [%]	Variação de E [%]
B6	Inicial	0	1415.7	5116.9	-	-
	m1	338	1473.7	4506.3	4.1	-11.9
	m2	674	1501.0	4059.2	6.0	-20.7
	m3	1009	1527.0	3557.3	7.9	-30.5
	m4	1345	1542.5	2789.7	9.0	-45.5
	m5	1680	1552.6	2731.3	9.7	-46.6
	m6	1992	1561.8	2430.0	10.3	-52.5
	m7	2351	1567.3	2523.0	10.7	-50.7
	m8	2684	1570.0	2578.8	10.9	-49.6
	m9	3022	1575.6	2405.1	11.3	-53.0
	m10	3355	1573.0	2559.2	11.1	-50.0
B7	Inicial	0	1342.0	5345.5	-	-
	m1	338	1387.5	3487.1	3.4	-34.8
	m2	674	1408.6	4009.6	5.0	-25.0
	m3	1009	1432.5	3826.7	6.7	-28.4
	m4	1345	1445.1	3309.7	7.7	-38.1
	m5	1680	1456.4	2531.8	8.5	-52.6
	m6	1992	1469.3	2727.6	9.5	-49.0
	m7	2351	1480.6	2287.4	10.3	-57.2
	m8	2684	1488.5	2284.5	10.9	-57.3
	m9	3022	1500.0	2267.7	11.8	-57.6
	m10	3355	1501.5	2192.2	11.9	-59.0
B8	Inicial	0	1387.6	5224.1	-	-
	m1	338	1434.0	4438.2	3.3	-15.0
	m2	674	1454.4	4345.3	4.8	-16.8
	m3	1009	1471.9	4083.2	6.1	-21.8
	m4	1345	1487.1	3549.6	7.2	-32.1
	m5	1680	1499.4	3196.6	8.1	-38.8
	m6	1992	1511.1	2952.0	8.9	-43.5
	m7	2351	1520.5	2806.9	9.6	-46.3
	m8	2684	1526.4	2715.1	10.0	-48.0
	m9	3022	1534.6	2632.5	10.6	-49.6
	m10	3355	1533.7	2712.2	10.5	-48.1
B9	Inicial	0	1408.5	5604.7	-	-
	m1	338	1467.7	4524.1	4.2	-19.3
	m2	674	1497.3	3885.0	6.3	-30.7
	m3	1009	1518.9	3605.2	7.8	-35.7
	m4	1345	1538.0	3019.6	9.2	-46.1
	m5	1680	1549.3	2805.2	10.0	-49.9
	m6	1992	1558.6	2616.5	10.7	-53.3
	m7	2351	1564.1	2627.1	11.0	-53.1
	m8	2684	1568.1	2514.4	11.3	-55.1
	m9	3022	1575.6	2554.8	11.9	-54.4
	m10	3355	1572.6	2646.6	11.7	-52.8
B10	Inicial	0	1342.7	5106.5	-	-
	m1	338	1389.9	4336.6	3.5	-15.1
	m2	674	1414.2	3830.0	5.3	-25.0
	m3	1009	1427.8	3680.2	6.3	-27.9
	m4	1345	1441.3	3445.1	7.3	-32.5
	m5	1680	1452.0	2989.1	8.1	-41.5
	m6	1992	1464.3	2708.0	9.1	-47.0
	m7	2351	1479.6	2437.3	10.2	-52.3
	m8	2684	1486.8	2427.9	10.7	-52.5
	m9	3022	1497.6	2109.5	11.5	-58.7
	m10	3355	1496.7	2237.5	11.5	-56.2
	m11	3693	1500.2	2121.2	11.7	-58.5

Tabela I.3 – Resultados individuais do material C no ensaio de imersão em água

Provete	Medição	Tempo [h]	Massa [g]	E [Mpa]	Variação massa [%]	Variação de E [%]
C1	Inicial	0	1366.4	6529.6	-	-
	m1	338	1428.1	5250.1	4.5	-19.6
	m2	673	1463.8	4470.3	7.1	-31.5
	m3	1009	1488.6	4003.4	8.9	-38.7
	m4	1344	1503.1	3787.5	10.0	-42.0
	m5	1680	1513.9	3741.7	10.8	-42.7
	m6	1991	1513.9	3708.1	10.8	-43.2
	m7	2351	1512.6	3768.4	10.7	-42.3
	m8	2683	1512.9	3870.3	10.7	-40.7
	m9	3022	1511.2	3779.1	10.6	-42.1
	m10	3354	1510.3	3840.7	10.5	-41.2
C2	Inicial	0	1375.4	6732.2	-	-
	m1	338	1434.2	5458.5	4.3	-18.9
	m2	673	1466.6	4985.7	6.6	-25.9
	m3	1009	1489.5	4494.1	8.3	-33.2
	m4	1344	1503.8	4336.6	9.3	-35.6
	m5	1680	1509.3	4227.4	9.7	-37.2
	m6	1991	1513.5	4378.8	10.0	-35.0
	m7	2351	1512.9	4437.9	10.0	-34.1
	m8	2683	1512.6	4348.3	10.0	-35.4
	m9	3022	1512.6	4414.3	10.0	-34.4
	m10	3354	1512.5	4477.4	10.0	-33.5
C3	Inicial	0	1377.6	6326.4	-	-
	m1	338	1435.0	5201.0	4.2	-17.8
	m2	673	1466.9	4584.3	6.5	-27.5
	m3	1009	1489.8	4046.9	8.1	-36.0
	m4	1344	1503.8	3905.5	9.2	-38.3
	m5	1680	1509.6	3804.1	9.6	-39.9
	m6	1991	1515.1	3878.8	10.0	-38.7
	m7	2351	1513.1	3927.4	9.8	-37.9
	m8	2683	1514.8	3951.7	10.0	-37.5
	m9	3022	1515.7	3870.9	10.0	-38.8
	m10	3354	1515.6	3936.2	10.0	-37.8
C4	Inicial	0	1356.9	6583.2	-	-
	m1	338	1418.6	5211.4	4.5	-20.8
	m2	673	1454.1	4480.1	7.2	-31.9
	m3	1009	1480.3	4058.0	9.1	-38.4
	m4	1344	1494.6	3870.0	10.2	-41.2
	m5	1680	1498.4	3787.5	10.4	-42.5
	m6	1991	1504.2	3829.0	10.9	-41.8
	m7	2351	1500.1	3824.6	10.6	-41.9
	m8	2683	1501.9	3894.7	10.7	-40.8
	m9	3022	1502.4	3789.3	10.7	-42.4
	m10	3354	1500.9	3884.7	10.6	-41.0
C5	Inicial	0	1358.7	6446.5	-	-
	m1	338	1414.6	5137.3	4.1	-20.3
	m2	673	1446.1	4551.0	6.4	-29.4
	m3	1009	1469.4	4120.0	8.1	-36.1
	m4	1344	1481.8	3886.7	9.1	-39.7
	m5	1680	1486.2	3845.0	9.4	-40.4
	m6	1991	1492.0	3949.2	9.8	-38.7
	m7	2351	1490.0	3980.4	9.7	-38.3
	m8	2683	1491.5	4038.0	9.8	-37.4
	m9	3022	1494.0	3937.9	10.0	-38.9
	m10	3354	1492.7	4001.1	9.9	-37.9
	m11	3693	1493.1	3978.5	9.9	-38.3

Tabela I.3 – Resultados individuais do material C no ensaio de imersão em água (continuação)

Provete	Medição	Tempo [h]	Massa [g]	E [Mpa]	Variação massa [%]	Variação de E [%]
C6	Inicial	0	1360.0	6596.8	-	-
	m1	338	1422.5	5248.3	4.6	-20.4
	m2	673	1454.7	4533.0	7.0	-31.3
	m3	1009	1486.0	4133.6	9.3	-37.3
	m4	1344	1497.1	3873.0	10.1	-41.3
	m5	1680	1502.2	3827.5	10.5	-42.0
	m6	1991	1504.6	3841.4	10.6	-41.8
	m7	2351	1502.3	3856.6	10.5	-41.5
	m8	2683	1500.3	4105.7	10.3	-37.8
	m9	3022	1504.6	3818.8	10.6	-42.1
	m10	3354	1503.8	3894.5	10.6	-41.0
	m11	3693	1503.8	3900.4	10.6	-40.9
C7	Inicial	0	1366.6	6238.1	-	-
	m1	338	1424.9	5116.9	4.3	-18.0
	m2	673	1455.3	4527.7	6.5	-27.4
	m3	1009	1477.7	4127.3	8.1	-33.8
	m4	1344	1490.8	4002.5	9.1	-35.8
	m5	1680	1494.9	3974.1	9.4	-36.3
	m6	1991	1499.8	3999.0	9.7	-35.9
	m7	2351	1498.6	3949.2	9.7	-36.7
	m8	2683	1503.1	3915.8	10.0	-37.2
	m9	3022	1502.7	3951.3	10.0	-36.7
	m10	3354	1500.7	3942.6	9.8	-36.8
	m11	3693	1501.7	4065.3	9.9	-34.8
C8	Inicial	0	1356.0	6645.8	-	-
	m1	338	1417.3	5208.5	4.5	-21.6
	m2	673	1450.2	4507.6	6.9	-32.2
	m3	1009	1474.7	4088.7	8.8	-38.5
	m4	1344	1490.0	3888.4	9.9	-41.5
	m5	1680	1493.1	3822.1	10.1	-42.5
	m6	1991	1498.1	3829.0	10.5	-42.4
	m7	2351	1497.0	3854.5	10.4	-42.0
	m8	2683	1498.9	3932.5	10.5	-40.8
	m9	3022	1500.5	3827.3	10.7	-42.4
	m10	3354	1499.8	3906.3	10.6	-41.2
	m11	3693	1500.2	3899.6	10.6	-41.3
C9	Inicial	0	1375.1	6351.8	-	-
	m1	338	1433.2	5181.8	4.2	-18.4
	m2	673	1464.1	4566.8	6.5	-28.1
	m3	1009	1485.2	4150.1	8.0	-34.7
	m4	1344	1501.7	3986.0	9.2	-37.2
	m5	1680	1503.8	3934.1	9.4	-38.1
	m6	1991	1507.4	3986.1	9.6	-37.2
	m7	2351	1507.7	3959.8	9.6	-37.7
	m8	2683	1512.2	4049.3	10.0	-36.3
	m9	3022	1511.7	3976.6	9.9	-37.4
	m10	3354	1508.8	3997.9	9.7	-37.1
	m11	3693	1510.8	4018.9	9.9	-36.7
C10	Inicial	0	1365.5	6476.1	-	-
	m1	338	1428.1	5149.3	4.6	-20.5
	m2	673	1463.9	4423.5	7.2	-31.7
	m3	1009	1498.9	3989.1	9.8	-38.4
	m4	1344	1508.5	3791.1	10.5	-41.5
	m5	1680	1508.5	3743.4	10.5	-42.2
	m6	1991	1510.6	3770.8	10.6	-41.8
	m7	2351	1507.5	3773.9	10.4	-41.7
	m8	2683	1512.2	3856.7	10.7	-40.4
	m9	3022	1511.9	3764.5	10.7	-41.9
	m10	3354	1509.2	3837.0	10.5	-40.8
	m11	3693	1511.6	3819.2	10.7	-41.0

Anexo 3

RESULTADOS INDIVIDUAIS DO ENSAIO DE EM AMBIENTE HÚMIDO

Tabela III.1 – Resultados individuais do material A no ensaio em ambiente húmido

Provete	Medição	Tempo [h]	Massa [g]	E [Mpa]	Variação massa [%]	Variação de E [%]
A1	Inicial	0	1382.2	2252.9	-	-
	m1	337	1383.6	2322.7	0.1	3.1
	m2	673	1384.3	2274.1	0.2	0.9
	m3	1176	1385.5	2136.5	0.2	-5.2
	m4	1848	1387.7	2066.5	0.4	-8.3
	m5	2541	1389.2	2259.1	0.5	0.3
	m6	3237	1391.1	2171.8	0.6	-3.6
A2	Inicial	0	1503.9	2509.3	-	-
	m1	337	1505.1	2499.6	0.1	-0.4
	m2	673	1505.7	2517.6	0.1	0.3
	m3	1176	1506.9	2364.3	0.2	-5.8
	m4	1848	1508.7	2292.3	0.3	-8.6
	m5	2541	1510.1	2459.4	0.4	-2.0
	m6	3237	1511.7	2439.0	0.5	-2.8
A3	Inicial	0	1337.1	2137.2	-	-
	m1	337	1338.5	2127.9	0.1	-0.4
	m2	673	1339.3	2198.4	0.2	2.9
	m3	1176	1340.7	2088.2	0.3	-2.3
	m4	1848	1342.9	1982.6	0.4	-7.2
	m5	2541	1344.5	2091.0	0.6	-2.2
	m6	3237	1346.3	2089.3	0.7	-2.2
A4	Inicial	0	1342.6	2171.2	-	-
	m1	337	1344.1	2078.2	0.1	-4.3
	m2	673	1344.9	2199.3	0.2	1.3
	m3	1176	1346.3	2114.4	0.3	-2.6
	m4	1848	1348.4	1890.1	0.4	-12.9
	m5	2541	1350.1	2025.1	0.6	-6.7
	m6	3237	1351.9	2135.2	0.7	-1.7
A5	Inicial	0	1363.2	2103.3	-	-
	m1	337	1364.6	2252.9	0.1	7.1
	m2	673	1365.3	2136.1	0.1	1.6
	m3	1176	1366.6	2007.5	0.2	-4.6
	m4	1848	1368.6	1942.4	0.4	-7.7
	m5	2541	1383.3	2223.8	1.5	5.7
	m6	3237	1371.9	2035.8	0.6	-3.2
A6	Inicial	0	1376.1	2240.1	-	-
	m1	337	1377.4	2313.8	0.1	3.3
	m2	673	1378.2	2261.9	0.2	1.0
	m3	1176	1379.6	2110.9	0.3	-5.8
	m4	1848	1381.7	2057.9	0.4	-8.1
	m5	2541	1370.1	2229.8	-0.4	-0.5
	m6	3237	1385.2	2173.0	0.7	-3.0
A7	Inicial	0	1376.7	2315.1	-	-
	m1	337	1378.1	2332.0	0.1	0.7
	m2	673	1378.8	2367.7	0.2	2.3
	m3	1176	1380.2	2139.1	0.3	-7.6
	m4	1848	1382.3	2167.1	0.4	-6.4
	m5	2541	1383.9	2185.5	0.5	-5.6
	m6	3237	1385.8	2240.8	0.7	-3.2
A8	Inicial	0	1351.6	2286.4	-	-
	m1	337	1353.0	2268.3	0.1	-0.8
	m2	673	1353.8	2249.7	0.2	-1.6
	m3	1176	1355.1	2184.5	0.3	-4.5
	m4	1848	1357.2	2063.1	0.4	-9.8
	m5	2541	1358.8	2195.7	0.5	-4.0
	m6	3237	1360.6	2158.6	0.7	-5.6

Tabela III.1 – Resultados individuais do material A no ensaio em ambiente húmido (continuação)

Provete	Medição	Tempo [h]	Massa [g]	E [Mpa]	Variação massa [%]	Variação de E [%]
A9	Inicial	0	1365.3	2291.4	-	-
	m1	337	1366.7	2237.4	0.1	-2.4
	m2	673	1367.5	2288.5	0.2	-0.1
	m3	1176	1368.9	2093.2	0.3	-8.7
	m4	1848	1371.0	2050.6	0.4	-10.5
	m5	2541	1372.8	2170.7	0.5	-5.3
	m6	3237	1374.7	2198.1	0.7	-4.1
A10	Inicial	0	1343.3	2206.0	-	-
	m1	337	1344.6	2231.5	0.1	1.2
	m2	673	1345.3	2228.4	0.2	1.0
	m3	1176	1346.6	2084.1	0.2	-5.5
	m4	1848	1348.5	2024.0	0.4	-8.3
	m5	2541	1350.1	2148.4	0.5	-2.6
	m6	3237	1351.9	2109.4	0.6	-4.4

Tabela III.2 – Resultados individuais do material B no ensaio em ambiente húmido

Provete	Medição	Tempo [h]	Massa [g]	E [Mpa]	Variação massa [%]	Variação de E [%]
B1	Inicial	0	1391.1	5429.2	-	-
	m1	338	1392.2	4952.6	0.1	-8.8
	m2	674	1392.8	4944.3	0.1	-8.9
	m3	1177	1394.3	4628.2	0.2	-14.8
	m4	1849	1396.5	4582.5	0.4	-15.6
	m5	2542	1398.1	4763.4	0.5	-12.3
	m6	3238	1400.3	4729.7	0.7	-12.9
B2	Inicial	0	1332.0	4957.3	-	-
	m1	338	1333.0	4886.9	0.1	-1.4
	m2	674	1333.5	5142.1	0.1	3.7
	m3	1177	1334.8	4763.0	0.2	-3.9
	m4	1849	1336.6	4727.7	0.3	-4.6
	m5	2542	1338.0	4791.5	0.5	-3.3
	m6	3238	1339.8	4871.5	0.6	-1.7
B3	Inicial	0	1409.1	5580.6	-	-
	m1	338	1410.1	5737.2	0.1	2.8
	m2	674	1410.7	5712.9	0.1	2.4
	m3	1177	1412.4	4907.0	0.2	-12.1
	m4	1849	1414.5	4876.1	0.4	-12.6
	m5	2542	1416.2	5025.2	0.5	-10.0
	m6	3238	1418.4	5401.3	0.7	-3.2
B4	Inicial	0	1349.2	5439.4	-	-
	m1	338	1350.3	5449.7	0.1	0.2
	m2	674	1350.9	5529.0	0.1	1.6
	m3	1177	1352.3	5105.0	0.2	-6.1
	m4	1849	1354.3	4272.0	0.4	-21.5
	m5	2542	1356.0	4444.4	0.5	-18.3
	m6	3238	1358.0	5230.0	0.7	-3.8
B5	Inicial	0	1395.8	5583.7	-	-
	m1	338	1396.8	5605.2	0.1	0.4
	m2	674	1397.3	5225.8	0.1	-6.4
	m3	1177	1398.8	4892.7	0.2	-12.4
	m4	1849	1400.7	4841.8	0.4	-13.3
	m5	2542	1402.2	5395.5	0.5	-3.4
	m6	3238	1404.1	5055.0	0.6	-9.5
B6	Inicial	0	1388.7	5391.2	-	-
	m1	338	1389.8	5111.4	0.1	-5.2
	m2	674	1390.4	5284.0	0.1	-2.0
	m3	1177	1392.0	5101.5	0.2	-5.4
	m4	1849	1394.3	4762.6	0.4	-11.7
	m5	2542	1396.1	4948.1	0.5	-8.2
	m6	3238	1398.3	5211.6	0.7	-3.3

Tabela III.2 – Resultados individuais do material B no ensaio em ambiente húmido (continuação)

Provete	Medição	Tempo [h]	Massa [g]	E [Mpa]	Variação massa [%]	Variação de E [%]
B7	Inicial	0	1345.7	5176.0	-	-
	m1	338	1346.7	5131.1	0.1	-0.9
	m2	674	1347.3	5116.7	0.1	-1.1
	m3	1177	1348.9	4874.4	0.2	-5.8
	m4	1849	1350.9	4816.0	0.4	-7.0
	m5	2542	1352.7	4958.3	0.5	-4.2
	m6	3238	1354.7	4958.8	0.7	-4.2
B8	Inicial	0	1417.0	5910.6	-	-
	m1	338	1418.0	5955.2	0.1	0.8
	m2	674	1418.6	5930.4	0.1	0.3
	m3	1177	1420.3	5590.5	0.2	-5.4
	m4	1849	1422.5	5629.0	0.4	-4.8
	m5	2542	1424.3	4508.6	0.5	-23.7
	m6	3238	1426.3	5760.7	0.7	-2.5
B9	Inicial	0	1399.8	5154.3	-	-
	m1	338	1400.8	5719.1	0.1	11.0
	m2	674	1401.4	5760.8	0.1	11.8
	m3	1177	1402.8	5368.9	0.2	4.2
	m4	1849	1404.7	5389.7	0.4	4.6
	m5	2542	1406.4	5068.9	0.5	-1.7
	m6	3238	1408.3	5548.9	0.6	7.7
B10	Inicial	0	1414.0	5679.5	-	-
	m1	338	1414.9	5733.0	0.1	0.9
	m2	674	1415.6	5348.0	0.1	-5.8
	m3	1177	1417.2	5004.6	0.2	-11.9
	m4	1849	1419.3	4985.6	0.4	-12.2
	m5	2542	1421.3	5469.0	0.5	-3.7
	m6	3238	1423.4	5408.7	0.7	-4.8

Tabela III.3 – Resultados individuais do material C no ensaio em ambiente húmido

Provete	Medição	Tempo [h]	Massa [g]	E [Mpa]	Variação massa [%]	Variação de E [%]
C1	Inicial	0	1355.4	6721.3	-	-
	m1	338	1357.6	6871.2	0.2	2.2
	m2	673	1359.2	6815.2	0.3	1.4
	m3	1177	1362.5	6721.6	0.5	0.0
	m4	1824	1366.9	6444.9	0.8	-4.1
	m5	2517	1370.5	6473.9	1.1	-3.7
	m6	3213	1374.1	6365.3	1.4	-5.3
C2	Inicial	0	1354.0	6532.7	-	-
	m1	338	1356.2	6598.4	0.2	1.0
	m2	673	1357.8	6559.4	0.3	0.4
	m3	1177	1361.0	6476.6	0.5	-0.9
	m4	1824	1365.5	6165.7	0.8	-5.6
	m5	2517	1368.9	6309.6	1.1	-3.4
	m6	3213	1372.6	6202.2	1.4	-5.1
C3	Inicial	0	1359.6	6561.9	-	-
	m1	338	1362.0	6607.2	0.2	0.7
	m2	673	1363.8	6595.0	0.3	0.5
	m3	1177	1367.5	6196.8	0.6	-5.6
	m4	1824	1377.1	5882.9	1.3	-10.3
	m5	2517	1375.9	6028.2	1.2	-8.1
	m6	3213	1381.1	5903.9	1.6	-10.0
C4	Inicial	0	1362.5	7014.7	-	-
	m1	338	1364.9	6855.3	0.2	-2.3
	m2	673	1366.7	6793.1	0.3	-3.2
	m3	1177	1370.3	6697.0	0.6	-4.5
	m4	1824	1376.0	6552.6	1.0	-6.6
	m5	2517	1379.8	6728.9	1.3	-4.1

Tabela III.3 – Resultados individuais do material C no ensaio em ambiente húmido (continuação)

Provete	Medição	Tempo [h]	Massa [g]	E [Mpa]	Variação massa [%]	Variação de E [%]
C4	m6	3213	1383.8	6582.8	1.6	-6.2
C5	Inicial	0	1365.5	6846.5	-	-
	m1	338	1368.0	6890.9	0.2	0.6
	m2	673	1369.8	6885.8	0.3	0.6
	m3	1177	1373.3	6540.1	0.6	-4.5
	m4	1824	1378.7	6112.9	1.0	-10.7
	m5	2517	1382.5	6591.8	1.2	-3.7
	m6	3213	1386.4	6149.1	1.5	-10.2
C6	Inicial	0	1364.7	6811.3	-	-
	m1	338	1367.3	7131.1	0.2	4.7
	m2	673	1369.1	7092.8	0.3	4.1
	m3	1177	1372.7	6507.6	0.6	-4.5
	m4	1824	1378.1	6391.1	1.0	-6.2
	m5	2517	1382.1	6505.8	1.3	-4.5
	m6	3213	1386.1	6616.0	1.6	-2.9
C7	Inicial	0	1364.7	6288.0	-	-
	m1	338	1372.2	6349.7	0.6	1.0
	m2	673	1374.1	6303.9	0.7	0.3
	m3	1177	1377.9	6303.1	1.0	0.2
	m4	1824	1382.9	6220.4	1.3	-1.1
	m5	2517	1387.0	6370.7	1.6	1.3
	m6	3213	1391.2	5900.7	1.9	-6.2
C8	Inicial	0	1364.2	6527.7	-	-
	m1	338	1366.6	6589.7	0.2	0.9
	m2	673	1368.4	6545.2	0.3	0.3
	m3	1177	1372.1	5936.2	0.6	-9.1
	m4	1824	1376.7	5768.7	0.9	-11.6
	m5	2517	1380.6	5948.0	1.2	-8.9
	m6	3213	1384.2	6203.9	1.5	-5.0
C9	Inicial	0	1369.9	6505.3	-	-
	m1	338	1372.2	6547.6	0.2	0.6
	m2	673	1374.0	6511.1	0.3	0.1
	m3	1177	1377.7	5937.1	0.6	-8.7
	m4	1824	1382.2	5814.3	0.9	-10.6
	m5	2517	1386.1	5983.6	1.2	-8.0
	m6	3213	1389.8	6159.5	1.5	-5.3
C10	Inicial	0	1359.4	6022.9	-	-
	m1	338	1361.5	6061.4	0.2	0.6
	m2	673	1363.2	6026.4	0.3	0.1
	m3	1177	1366.7	6029.0	0.5	0.1
	m4	1824	1371.1	5636.7	0.9	-6.4
	m5	2517	1374.8	6029.9	1.1	0.1
	m6	3213	1378.2	5625.1	1.4	-6.6

Anexo 4

RESULTADOS INDIVIDUAIS DO ENSAIO DE DE RESISTÊNCIA À HUMIDADE

Tabela IV.1 – Resultados individuais do material A no ensaio de resistência à humidade

Provete	Fase	Massa (g)	E (Mpa)	% Variação de E em relação à fase anterior	% Variação de E em relação à fase inicial	% Variação de massa em relação à fase inicial
A1	Inicial	1502.3	2443.7	-	-	-
	Im1	1513.1	2367.0	-3.14%	-3.14	0.72
	E1	1490.7	1815.7	-23.29%	-25.70	-0.77
	Im2	1508.9	2287.4	25.97%	-6.40	0.44
	E2	1489.1	1996.3	-12.73%	-18.31	-0.88
	Im3	1502.7	2340.7	17.25%	-4.22	0.03
	E3	1487.8	1836.4	-21.55%	-24.85	-0.96
A2	Final	1497.6	2253.9	22.74%	-7.77	-0.31
	Inicial	1504.9	2517.1	-	-	-
	Im1	1514.8	2566.4	1.96%	1.96	0.66
	E1	1493.3	1925.1	-24.99%	-23.52	-0.77
	Im2	1510.3	2305.3	19.75%	-8.41	0.36
	E2	1491.8	2071.8	-10.13%	-17.69	-0.87
	Im3	1504.7	2368.8	14.33%	-5.89	-0.01
A3	E3	1490.7	1928.7	-18.58%	-23.37	-0.94
	Final	1500.7	2272.0	17.80%	-9.74	-0.28
	Inicial	1481.7	3477.3	-	-	-
	Im1	1520.5	3074.6	-11.58%	-11.58	2.61
	E1	1468.0	2278.4	-25.90%	-34.48	-0.93
	Im2	1503.8	3100.3	36.07%	-10.84	1.49
	E2	1466.5	2394.1	-22.78%	-31.15	-1.03
A4	Im3	1595.9	3108.8	29.86%	-10.60	7.71
	E3	1465.5	2262.3	-27.23%	-34.94	-1.09
	Final	1482.8	3211.6	41.96%	-7.64	0.07
	Inicial	1342.8	2217.0	-	-	-
	Im1	1363.5	2030.1	-8.43%	-8.43	1.54
	E1	1331.4	1677.1	-17.39%	-24.35	-0.85
	Im2	1356.2	1975.2	17.77%	-10.91	1.00
A5	E2	1329.0	1499.1	-24.10%	-32.38	-1.03
	Im3	1351.4	2022.2	34.89%	-8.79	0.64
	E3	1327.5	1533.4	-24.17%	-30.83	-1.14
	Final	1339.0	1828.3	19.23%	-17.53	-0.28
	Inicial	1341.270	2268.821	-	-	-
	Im1	1360.2	2178.8	-3.97%	-3.97	1.41
	E1	1329.6	1728.2	-20.68%	-23.83	-0.87
A6	Im2	1352.0	2051.0	18.68%	-9.60	0.80
	E2	1327.1	1562.0	-23.84%	-31.15	-1.06
	Im3	1347.2	2129.2	36.31%	-6.15	0.45
	E3	1325.6	1647.7	-22.61%	-27.38	-1.17
	Final	1336.9	1985.0	20.47%	-12.51	-0.33
	Inicial	1365.8	2305.3	-	-	-
	Im1	1385.8	2224.7	-3.49%	-3.49	1.47
A7	E1	1355.5	1798.1	-19.18%	-22.00	-0.75
	Im2	1377.2	2075.4	15.42%	-9.97	0.84
	E2	1351.3	1721.2	-17.07%	-25.33	-1.06
	Im3	1372.0	2097.3	21.85%	-9.02	0.46
	E3	1349.8	1742.6	-16.91%	-24.41	-1.17
	Final	1361.6	1987.0	14.02%	-13.81	-0.30
	Inicial	1372.4	2319.4	-	-	-
A7	Im1	1398.0	2204.9	-4.94%	-4.94	1.86
	E1	1360.4	1791.6	-18.75%	-22.76	-0.88
	Im2	1385.6	2057.0	14.81%	-11.32	0.96
	E2	1357.4	1571.7	-23.59%	-32.24	-1.10
	Im3	1377.9	2051.4	30.52%	-11.55	0.40
	E3	1355.9	1565.5	-23.69%	-32.51	-1.20
	Final	1367.2	2049.7	30.93%	-11.63	-0.38

Tabel IV.1 –Resultados individuais do material A no ensaio de resistência à humidade (continuação)

Provete	Fase	Massa (g)	E (Mpa)	% Variação de E em relação à fase anterior	% Variação de E em relação à fase inicial	% Variação de massa em relação à fase inicial
A8	Inicial	1484.4	3622.3	-	-	-
	Im1	1525.9	2784.1	-23.14%	-23.14	2.79
	E1	1471.5	2867.8	3.01%	-20.83	-0.87
	Im2	1506.5	3165.6	10.38%	-12.61	1.49
	E2	1467.8	2189.1	-30.84%	-39.56	-1.12
	Im3	1498.1	2743.5	25.32%	-24.26	0.92
	E3	1466.6	2473.8	-9.83%	-31.71	-1.20
A9	Final	1483.3	2628.9	6.27%	-27.42	-0.07
	Inicial	1345.5	2303.4	-	-	-
	Im1	1366.6	2201.9	-4.41%	-4.41	1.57
	E1	1333.0	1731.4	-21.37%	-24.83	-0.93
	Im2	1355.6	2009.3	16.05%	-12.77	0.75
	E2	1330.2	1603.3	-20.20%	-30.40	-1.14
	Im3	1348.8	2067.9	28.98%	-10.22	0.24
A10	E3	1328.8	1567.0	-24.22%	-31.97	-1.25
	Final	1339.6	1961.0	25.14%	-14.87	-0.44
	Inicial	1346.6	2278.9	-	-	-
	Im1	1369.7	2160.5	-5.19%	-5.19	1.71
	E1	1334.0	1782.3	-17.51%	-21.79	-0.94
	Im2	1358.0	2012.4	12.91%	-11.69	0.85
	E2	1331.3	1649.2	-18.05%	-27.63	-1.14
	Im3	1351.6	2075.7	25.86%	-8.92	0.37
	E3	1329.9	1625.8	-21.68%	-28.66	-1.24
	Final	1341.0	1952.5	20.10%	-14.32	-0.41

Tabela IV.2 – Resultados individuais do material B no ensaio de resistência à humidade

Provete	Fase	Massa (g)	E (Mpa)	% Variação de E em relação à fase anterior	% Variação de E em relação à fase inicial	% Variação de massa em relação à fase inicial
B1	Inicial	1392.7	5113.8	-	-	-
	Im1	1419.6	4954.1	-3.12%	-3.12	1.93
	E1	1381.8	3878.2	-21.72%	-24.16	-0.78
	Im2	1407.9	4696.4	21.10%	-8.16	1.10
	E2	1380.1	4219.7	-10.15%	-17.48	-0.90
	Im3	1405.5	4628.5	9.69%	-9.49	0.92
	E3	1378.4	3710.7	-19.83%	-27.44	-1.03
B2	Final	1391.2	4702.9	26.74%	-8.04	-0.11
	Inicial	1407.6	5304.3	-	-	-
	Im1	1435.7	5040.2	-4.98%	-4.98	2.00
	E1	1392.7	3597.7	-28.62%	-32.17	-1.06
	Im2	1420.9	4673.7	29.91%	-11.89	0.94
	E2	1390.8	3934.9	-15.81%	-25.82	-1.20
	Im3	1416.8	4621.1	17.44%	-12.88	0.66
B3	E3	1389.0	3513.8	-23.96%	-33.76	-1.32
	Final	1403.5	4725.9	34.50%	-10.90	-0.29
	Inicial	1387.4	5129.5	-	-	-
	Im1	1419.6	4817.2	-6.09%	-6.09	2.32
	E1	1376.0	3960.0	-17.79%	-22.80	-0.82
	Im2	1404.4	4785.9	20.86%	-6.70	1.22
	E2	1374.3	4282.9	-10.51%	-16.50	-0.94
	Im3	1400.4	4795.9	11.98%	-6.50	0.93
	E3	1372.8	3934.7	-17.96%	-23.29	-1.05
	Final	1385.5	4741.7	20.51%	-7.56	-0.14

Tabela IV.2 – Resultados individuais do material B no ensaio de resistência à humidade (continuação)

Provete	Fase	Massa (g)	E (Mpa)	% Variação de E em relação à fase anterior	% Variação de E em relação à fase inicial	% Variação de massa em relação à fase inicial
B4	Inicial	1387.4	5180.4	-	-	-
	Im1	1414.0	5121.7	-1.13%	-1.13	1.91
	E1	1375.7	4043.2	-21.06%	-21.95	-0.84
	Im2	1401.9	4927.8	21.88%	-4.88	1.04
	E2	1374.0	4309.6	-12.55%	-16.81	-0.97
	Im3	1398.0	4730.1	9.76%	-8.69	0.76
	E3	1372.6	4082.8	-13.69%	-21.19	-1.07
B5	Final	1387.3	4866.1	19.19%	-6.07	-0.01
	Inicial	1409.7	5594.6	-	-	-
	Im1	1442.7	5203.3	-6.99%	-6.99	2.34
	E1	1399.2	4429.3	-14.88%	-20.83	-0.74
	Im2	1430.9	4981.6	12.47%	-10.96	1.51
	E2	1395.7	4093.7	-17.82%	-26.83	-0.99
	Im3	1421.5	5024.8	22.75%	-10.18	0.84
B6	E3	1393.9	4312.3	-14.18%	-22.92	-1.12
	Final	1408.4	4497.8	4.30%	-19.60	-0.09
	Inicial	1386.9	5460.2	-	-	-
	Im1	1416.1	4908.9	-10.10%	-10.10	2.11
	E1	1376.1	4223.7	-13.96%	-22.65	-0.78
	Im2	1403.6	4676.8	10.73%	-14.35	1.20
	E2	1373.0	3847.0	-17.74%	-29.55	-1.00
B7	Im3	1395.9	4765.3	23.87%	-12.73	0.65
	E3	1371.3	3840.9	-19.40%	-29.66	-1.12
	Final	1385.5	4650.9	21.09%	-14.82	-0.10
	Inicial	1394.3	5023.9	-	-	-
	Im1	1420.3	5152.1	2.55%	2.55	1.87
	E1	1384.7	4087.4	-20.67%	-18.64	-0.69
	Im2	1409.3	4895.6	19.77%	-2.55	1.07
B8	E2	1382.0	3667.5	-25.09%	-27.00	-0.88
	Im3	1402.4	5025.6	37.03%	0.03	0.58
	E3	1380.5	4007.9	-20.25%	-20.22	-0.99
	Final	1392.2	4797.3	19.70%	-4.51	-0.15
	Inicial	1387.2	5206.2	-	-	-
	Im1	1414.7	5006.5	-3.83%	-3.83	1.99
	E1	1376.5	4427.1	-11.57%	-14.96	-0.77
B9	Im2	1404.4	4788.8	8.17%	-8.02	1.24
	E2	1372.8	4094.6	-14.50%	-21.35	-1.04
	Im3	1398.6	4797.8	17.17%	-7.84	0.83
	E3	1371.9	3886.8	-18.99%	-25.34	-1.10
	Final	1384.7	4479.4	15.25%	-13.96	-0.18
	Inicial	1349.2	5173.3	-	-	-
	Im1	1379.2	4797.2	-7.27%	-7.27	2.22
B10	E1	1335.8	4272.1	-10.95%	-17.42	-0.99
	Im2	1367.6	4554.0	6.60%	-11.97	1.36
	E2	1331.5	3940.1	-13.48%	-23.84	-1.31
	Im3	1363.4	4825.4	22.47%	-6.72	1.06
	E3	1330.2	3715.9	-22.99%	-28.17	-1.40
	Final	1344.6	4572.2	23.04%	-11.62	-0.34
	Inicial	1543.6	5559.6	-	-	-
B10	Im1	1557.9	5211.5	-6.26%	-6.26	0.93
	E1	1534.6	4470.3	-14.22%	-19.59	-0.58
	Im2	1551.0	5099.7	14.08%	-8.27	0.48
	E2	1532.0	4061.4	-20.36%	-26.95	-0.75
	Im3	1547.1	5320.6	31.00%	-4.30	0.23
	E3	1530.9	3985.7	-25.09%	-28.31	-0.83
	Final	1539.5	4998.1	25.40%	-10.10	-0.26

Tabela IV.3 – Resultados individuais do material A no ensaio de resistência à humidade

Provete	Fase	Massa (g)	E (Mpa)	% Variação de E em relação à fase anterior	% Variação de E em relação à fase inicial	% Variação de massa em relação à fase inicial
C1	Inicial	1358.7	6746.7	-	-	-
	Im1	1384.0	6195.5	-8.17%	-8.17	1.87
	E1	1323.8	5629.8	-9.13%	-16.55	-2.57
	Im2	1366.8	5684.8	0.98%	-15.74	0.60
	E2	1319.1	5498.9	-3.27%	-18.50	-2.91
	Im3	1360.0	5730.8	4.22%	-15.06	0.10
	E3	1315.9	5393.8	-5.88%	-20.05	-3.15
C2	Final	1356.8	5979.2	10.85%	-11.38	-0.14
	Inicial	1349.5	6526.8	-	-	-
	Im1	1376.0	5995.8	-8.14%	-8.14	1.97
	E1	1316.6	5313.2	-11.38%	-18.59	-2.44
	Im2	1360.3	5393.6	1.51%	-17.36	0.80
	E2	1313.7	5124.4	-4.99%	-21.49	-2.65
	Im3	1355.6	5367.3	4.74%	-17.77	0.45
C3	E3	1310.7	4908.7	-8.54%	-24.79	-2.88
	Final	1353.1	5573.8	13.55%	-14.60	0.26
	Inicial	1365.5	6632.6	-	-	-
	Im1	1390.0	6338.1	-4.44%	-4.44	1.79
	E1	1328.4	5675.2	-10.46%	-14.43	-2.72
	Im2	1371.1	5767.2	1.62%	-13.05	0.41
	E2	1323.0	5471.6	-5.13%	-17.50	-3.11
C4	Im3	1363.4	5665.8	3.55%	-14.58	-0.15
	E3	1319.5	5360.8	-5.38%	-19.17	-3.37
	Final	1361.2	5963.7	11.25%	-10.09	-0.32
	Inicial	1367.8	6751.3	-	-	-
	Im1	1394.5	6093.0	-9.75%	-9.75	1.95
	E1	1331.6	5759.2	-5.48%	-14.69	-2.64
	Im2	1373.1	5665.4	-1.63%	-16.08	0.39
C5	E2	1324.0	5424.1	-4.26%	-19.66	-3.20
	Im3	1366.9	5769.2	6.36%	-14.55	-0.06
	E3	1320.2	5379.8	-6.75%	-20.31	-3.48
	Final	1361.0	5757.0	7.01%	-14.73	-0.50
	Inicial	1363.4	6258.8	-	-	-
	Im1	1388.7	5542.3	-11.45%	-11.45	1.86
	E1	1324.4	4995.3	-9.87%	-20.19	-2.86
C6	Im2	1363.7	4915.8	-1.59%	-21.46	0.02
	E2	1316.6	4615.5	-6.11%	-26.26	-3.43
	Im3	1358.4	5084.9	10.17%	-18.76	-0.36
	E3	1313.5	4635.4	-8.84%	-25.94	-3.66
	Final	1355.4	4994.2	7.74%	-20.20	-0.59
	Inicial	1372.7	6727.1	-	-	-
	Im1	1400.2	6220.0	-7.54%	-7.54	2.00
C7	E1	1337.5	5846.9	-6.00%	-13.09	-2.56
	Im2	1378.8	5679.1	-2.87%	-15.58	0.44
	E2	1329.8	5525.8	-2.70%	-17.86	-3.13
	Im3	1372.5	5844.3	5.76%	-13.12	-0.02
	E3	1326.5	5520.1	-5.55%	-17.94	-3.37
	Final	1366.9	5947.3	7.74%	-11.59	-0.42
	Inicial	1347.3	6511.1	-	-	-
C7	Im1	1376.3	5833.1	-10.41%	-10.41	2.15
	E1	1315.9	5395.0	-7.51%	-17.14	-2.33
	Im2	1356.4	5302.3	-1.72%	-18.57	0.67
	E2	1309.8	5080.1	-4.19%	-21.98	-2.78
	Im3	1352.0	5325.4	4.83%	-18.21	0.35
	E3	1307.2	4895.9	-8.06%	-24.81	-2.98
	Final	1346.8	5457.3	11.47%	-16.18	-0.03

Tabela IV.3 – Resultados individuais do material A no ensaio de resistência à humidade (continuação)

Provete	Fase	Massa (g)	E (Mpa)	% Variação de E em relação à fase anterior	% Variação de E em relação à fase inicial	% Variação de massa em relação à fase inicial
C8	Inicial	1354.9	6889.5	-	-	-
	Im1	1381.0	6195.4	-10.08%	-10.08	1.93
	E1	1321.8	5896.1	-4.83%	-14.42	-2.44
	Im2	1361.8	5890.0	-0.10%	-14.51	0.51
	E2	1312.9	5626.0	-4.48%	-18.34	-3.10
	Im3	1355.6	5826.2	3.56%	-15.43	0.05
	E3	1309.6	5533.2	-5.03%	-19.69	-3.34
C9	Final	1347.5	5917.8	6.95%	-14.10	-0.54
	Inicial	1362.9	5962.7	-	-	-
	Im1	1387.2	5655.1	-5.16%	-5.16	1.78
	E1	1325.4	4915.1	-13.09%	-17.57	-2.75
	Im2	1364.6	4953.0	0.77%	-16.93	0.12
	E2	1316.0	4628.7	-6.55%	-22.37	-3.44
	Im3	1358.4	5074.9	9.64%	-14.89	-0.34
C10	E3	1312.9	4558.2	-10.18%	-23.55	-3.67
	Final	1353.7	4962.0	8.86%	-16.78	-0.68
	Inicial	1364.6	6406.4	-	-	-
	Im1	1393.9	5939.2	-7.29%	-7.29	2.15
	E1	1331.0	5395.5	-9.16%	-15.78	-2.46
	Im2	1373.3	5447.9	0.97%	-14.96	0.63
	E2	1323.5	4951.1	-9.12%	-22.72	-3.01
	Im3	1368.4	5399.1	9.05%	-15.72	0.28
	E3	1321.8	4891.5	-9.40%	-23.65	-3.14
	Final	1362.3	5474.3	11.91%	-14.55	-0.17